

Stratégie optimisée de contrôle de statisme assistées par réseaux
de neurones pour la gestion des convertisseurs de puissance
monophasés dans les micro-réseaux intelligents

par

Saad BELGANA

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTRÉAL, LE 18 DÉCEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Saad BELGANA, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Handy Fortin Blanchette, directeur de thèse
Département de génie électrique, École de technologie supérieure

M. Vincent Duchaine, président du jury
Département de génie de la production automatisée de l'école de technologie supérieure

Mme. Ouassima Akhrif, membre du jury
Département de génie électrique de l'école de technologie supérieure

M. Ambrish Chandra, membre du jury
Département de génie électrique de l'école de technologie supérieure

M. Houshang Karimi, examinateur externe indépendant
Département de génie électrique de l'école polytechnique de Montréal

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 10 DÉCEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de cette thèse de doctorat en génie électrique représente bien plus qu'un accomplissement académique. Il symbolise la victoire d'un parcours marqué par des défis personnels profonds et la force extraordinaire de ceux qui m'ont accompagné. Ces quelques lignes ne sauraient exprimer pleinement ma gratitude, mais j'espère qu'elles témoigneront de la reconnaissance infinie que je porte à chacun.

Ma gratitude la plus profonde va au Professeur Handy Fortin Blanchette, mon directeur de recherche. Les mots « directeur de recherche » sont insuffisants pour décrire son rôle dans mon parcours. Il a été un père académique, un conseiller éclairé, un ami sincère et un confident bienveillant. Durant les deux années d'arrêt maladie qui ont interrompu mon parcours doctoral, alors que la dépression et l'épuisement professionnel m'avaient ébranlé, il n'a jamais cessé de croire en moi. Sa patience infinie, sa compréhension profonde et son soutien indéfectible m'ont permis de retrouver le chemin vers l'accomplissement de cette thèse. Au-delà de la recherche, le Professeur Fortin Blanchette a façonné ma carrière académique en me confiant mes premiers contrats comme chargé de laboratoire, puis comme chargé de cours pour enseigner la matière que j'avais étudiée sous sa direction. Cette confiance qu'il m'a accordée représente le fondement de ma vie professionnelle actuelle. Pour tout cela, et pour les innombrables moments où il a choisi l'humanité avant les protocoles, je lui serai éternellement reconnaissant.

À ma femme, Abila Dabib, qui a été mon ancre dans les tempêtes les plus violentes. Dans les moments où la maladie obscurcissait toute perspective, elle est restée cette lumière constante qui m'a guidé vers la guérison. Son amour inconditionnel et sa force tranquille ont été les piliers sur lesquels j'ai pu reconstruire ma détermination.

À mes filles, Aliya et Yakout, mes sources d'inspiration quotidiennes. Sans le savoir, elles ont été mes plus grandes thérapeutes. Les voir grandir, s'épanouir et affronter leurs propres défis quotidiens avec courage et sans jamais se plaindre m'a rappelé chaque jour pourquoi il fallait continuer. Leur simple existence m'a tiré des profondeurs de la dépression et m'a donné la force de terminer ce parcours doctoral.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma belle-mère, dont le soutien constant a allégé les fardeaux familiaux et permis de maintenir l'équilibre nécessaire à la poursuite de mes travaux. Sa présence rassurante et son aide pratique ont été inestimables.

À mon oncle Tarek Abounnaim, dont l'encouragement et la sagesse m'ont accompagné tout au long de ce parcours, je témoigne ma sincère gratitude.

À mes parents, qui ont semé les graines de la persévérance et de la curiosité intellectuelle dès mon plus jeune âge, et à mes frères, compagnons de vie dont le soutien fraternel ne s'est jamais démenti, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux.

Je remercie sincèrement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer cette thèse sur les réseaux électriques intelligents. Leur expertise et leurs commentaires constructifs ont enrichi considérablement la qualité de ce travail de recherche.

Je souhaite également remercier le Département de génie électrique de l'École de technologie supérieure pour avoir fourni l'environnement académique et les ressources nécessaires à la réalisation de cette recherche.

Ce parcours doctoral m'a enseigné que la résilience se construit dans l'adversité, mais surtout qu'elle se nourrit de la bienveillance de ceux qui nous entourent. Lorsque, hospitalisé le jour de mon examen doctoral, j'ai dit à mon directeur que je voulais en finir, soit en réussissant, soit en changeant de voie, il a compris que ma détermination était ma dernière force. Cette thèse est le témoignage que même dans les moments les plus sombres, avec le soutien approprié, il est possible de transformer la souffrance en accomplissement.

À tous ceux qui ont croisé mon chemin durant ces années et ont contribué, même par un simple mot d'encouragement, à ma persévérance, je vous adresse ma gratitude sincère.

Cette thèse est dédiée à tous ceux qui luttent en silence contre leurs propres tempêtes intérieures. Que mon parcours soit la preuve qu'avec du soutien, de la patience et de la persévérance, il est possible de traverser les épreuves les plus difficiles et d'en ressortir grandi.

Stratégie optimisée de contrôle de statisme assistées par réseaux de neurones pour la gestion des convertisseurs de puissance monophasés dans les micro-réseaux intelligents

Saad BELGANA

RÉSUMÉ

Dans le contexte des enjeux énergétiques et environnementaux actuels, l'importance stratégique des micro-réseaux, notamment pour l'intégration de ressources énergétiques décentralisées, est indéniable. Ces systèmes se caractérisent par leur capacité à intégrer diverses sources d'énergies renouvelables et à assurer une électrification efficace des sites isolés, constituant ainsi une alternative viable aux systèmes énergétiques centralisés. Toutefois, l'intégration de sources d'énergie renouvelables, notoirement intermittentes, pose d'importants défis en termes de performance, de stabilité et de gestion de la puissance. Cette thèse aborde ces défis, en se concentrant particulièrement sur la gestion des convertisseurs de puissance monophasés au sein des micro-réseaux. Il est proposé une méthode de commande vectorielle, qui a démontré une amélioration significative de la robustesse et de la fiabilité, répondant aux complexités propres aux micro-réseaux. En mode autonome, un système de contrôle de statisme, basé sur les Réseaux de Neurones Artificiels, est développé pour un partage équilibré de la puissance entre les générateurs distribués en parallèle. Ce système offre une régulation de puissance adaptative et précise, particulièrement réactive aux variabilités des sources renouvelables. En mode connecté, une méthode de contrôle de statisme, également basée sur les Réseaux de Neurones Artificiels et conforme à la norme IEEE1547, est introduite. Cette approche garantit une intégration harmonieuse des générateurs distribués au réseau électrique principal, tout en respectant les critères rigoureux de la norme en matière de stabilité et de performance. Pour ces deux modes, les Réseaux de Neurones Artificiels ont été entraînés à partir de données issues de simulations détaillées, et les points d'opération ont été optimisés via une méthode d'optimisation par essaim particulière. Cette stratégie permet une gestion optimale des micro-réseaux, leur conférant la capacité de s'adapter dynamiquement à la volatilité des sources d'énergie renouvelables. Les résultats obtenus attestent que la stratégie de contrôle proposée améliore significativement la stabilité et la gestion de la distribution de puissance dans les micro-réseaux, tant en mode îlotage qu'en mode connecté. Cette avancée est cruciale pour le développement de systèmes de puissance distribués plus efficaces et performants, facilitant une intégration plus stable et efficiente des énergies renouvelables dans les futurs systèmes de distribution d'énergie.

Mots-clés: micro-réseaux, générateurs distribués, Réseaux de Neurones Artificiels, contrôle de statisme, îlotage, optimisation par essaim particulière, IEEE1547

Optimized dcoop Control strategies assisted by neural networks for single-phase power converter management in smart microgrids

Saad BELGANA

ABSTRACT

In the context of current energy and environmental challenges, the strategic importance of microgrids, particularly for the integration of decentralized energy resources, is undeniable. These systems are characterized by their ability to integrate various renewable energy sources and ensure efficient electrification of isolated sites, thus constituting a viable alternative to centralized energy systems. However, the integration of renewable energy sources, notoriously intermittent, poses significant challenges in terms of performance, stability, and power management. This thesis addresses these challenges, focusing particularly on the management of single-phase power converters within microgrids. A vector control method is proposed, which has demonstrated significant improvement in robustness and reliability, addressing the complexities specific to microgrids. In autonomous mode, a droop control system based on Artificial Neural Networks is developed for balanced power sharing between distributed generators operating in parallel. This system offers adaptive and precise power regulation, particularly responsive to the variabilities of renewable sources. In grid-connected mode, a droop control method, also based on Artificial Neural Networks and compliant with IEEE1547 standard, is introduced. This approach ensures harmonious integration of distributed generators with the main electrical grid, while respecting the standard's rigorous criteria for stability and performance. For both modes, the Artificial Neural Networks were trained using data from detailed simulations, and the operating points were optimized through a particle swarm optimization method. This strategy enables optimal management of microgrids, conferring upon them the ability to dynamically adapt to the volatility of renewable energy sources. The obtained results demonstrate that the proposed control strategy significantly improves stability and power distribution management in microgrids, both in islanded and grid-connected modes. This advancement is crucial for the development of more efficient and effective distributed power systems, facilitating more stable and efficient integration of renewable energies into future energy distribution systems.

Keywords: microgrids, distributed generators, Artificial Neural Networks, droop control, islanding, particle swarm optimization, IEEE1547

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART ET DYNAMIQUE DES MICRO-RÉSEAUX	11
1.1 Introduction	11
1.2 Définition et évolution des micro-réseaux	12
1.2.1 Définition et concepts fondamentaux	13
1.2.1.1 Définitions dans la littérature	13
1.2.1.2 Attributs essentiels	14
1.2.1.3 Comparaison avec le modèle centralisé	14
1.2.1.4 Avantages du modèle décentralisé	16
1.2.2 Contexte historique	16
1.2.3 Caractéristiques fondamentales	17
1.2.4 Défis structurels	18
1.3 Architecture physique et composants	18
1.3.1 Unités de génération d'énergie distribuées	19
1.3.1.1 Sources renouvelables	19
1.3.1.2 Sources conventionnelles	20
1.3.2 Systèmes de stockage	20
1.3.2.1 Stockage électrochimique	20
1.3.2.2 Stockage à haute puissance	21
1.3.3 Infrastructure de conversion	21
1.3.3.1 Convertisseurs sources de tension (VSI)	21
1.3.3.2 Filtres et protections	22
1.3.4 Architecture de contrôle	22
1.3.4.1 Contrôle local	22
1.3.4.2 Contrôle centralisé	23
1.3.5 Défis techniques et opérationnels	23
1.3.5.1 Stabilité et qualité de l'onde	23
1.3.5.2 Gestion de l'intermittence	24
1.4 Modes opérationnels et transitions	24
1.4.1 Mode connecté au réseau principal	25
1.4.2 Transition vers le mode isolé	26
1.4.3 Mode isolé	26
1.4.3.1 Processus de reconnexion	28
1.5 Architectures de contrôle	28
1.5.1 Approche centralisée	29
1.5.2 Approche décentralisée	30
1.5.3 Systèmes hybrides	31
1.5.4 Critères de choix et évolution	33
1.6 Structure de contrôle hiérarchique	33

1.6.1	Contrôle interne (niveau 0)	34
1.6.1.1	Contrôle des convertisseurs	34
1.6.1.2	Techniques de modulation	34
1.6.2	Contrôle primaire	35
1.6.2.1	Contrôle de la tension et de la fréquence	35
1.6.3	Contrôle secondaire	36
1.6.3.1	Restauration des valeurs nominales	36
1.6.4	Contrôle tertiaire	36
1.6.4.1	Optimisation économique	37
1.6.5	Coordination entre niveaux	37
1.6.5.1	Séparation des échelles de temps	37
1.7	Stratégies de contrôle des convertisseurs	38
1.7.1	Convertisseurs formateurs de réseau	38
1.7.2	Convertisseurs alimentant le réseau	40
1.7.3	Convertisseurs de support réseau	41
1.7.3.1	Mode source de tension	41
1.7.3.2	Mode source de courant	42
1.7.4	Techniques de synchronisation	43
1.7.4.1	Méthodes de synchronisation modernes	43
1.7.4.2	Gestion des transitions	44
1.8	Technologies avancées et tendances	44
1.8.1	Intelligence artificielle et apprentissage	45
1.8.1.1	Réseaux de neurones pour le contrôle	45
1.8.1.2	Apprentissage par renforcement	46
1.8.2	Contrôle prédictif	46
1.8.2.1	Modélisation et prédiction	47
1.8.2.2	Optimisation en temps réel	47
1.8.3	Cybersécurité	48
1.8.3.1	Protection des communications	48
1.9	Conclusion	48
 CHAPITRE 2 MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION POUR LES CONVERTISSEURS CC-CA MONOPHASÉS		
2.1	Introduction	51
2.2	Contrôle de la tension dans les convertisseurs CC-CA monophasés	52
2.2.1	Contrôle par modulation de largeur d'impulsion	54
2.2.2	Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale	55
2.2.2.1	Principe de fonctionnement	56
2.2.2.2	Implémentation dans un convertisseur demi-pont	56
2.3	Convertisseurs CC-CA monophasés en pont complet	59
2.3.1	Schéma du convertisseur CC-CA monophasé en pont complet	59
2.3.2	MLIS avec commutation bipolaire	60
2.3.3	MLIS avec commutation unipolaire	64

2.4	Conclusion	68
 CHAPITRE 3 MODÉLISATION DU CONVERTISSEUR CC-CA MONOPHASÉ DANS LE RÉFÉRENTIEL ROTATIF		
3.1	Introduction	71
3.2	Synthèse de phases orthogonales dans les systèmes monophasés via SOGI-QSG ...	72
3.2.1	Techniques de synthèse de phases orthogonales	73
3.2.2	Mise en oeuvre du SOGI-QSG	74
3.2.2.1	Fonctionnement du SOGI-QSG	74
3.2.2.2	Formules mathématiques du SOGI-QSG	76
3.2.2.3	Mise en oeuvre du SOGI-QSG dans MATLAB/SIMULINK	77
3.3	Optimisation des convertisseurs CC-CA par la transformation de Park	78
3.3.1	Fondements de la transformation de Park	79
3.3.2	Application et validation de la transformation de Park	80
3.3.3	Bénéfices de la transformation de Park pour les systèmes monophasés	81
3.4	Analyse et modélisation d'un convertisseur CC-CA monophasé	82
3.4.1	Modélisation en mode autonome du convertisseur CC-CA monophasé ...	82
3.4.1.1	Modélisation en mode autonome dans le référentiel stationnaire	83
3.4.1.2	Modélisation en mode autonome dans le référentiel rotatif	84
3.4.2	Modélisation d'un convertisseur CC-CA monophasé en interaction avec le réseau électrique	85
3.4.2.1	Approche stationnaire du convertisseur CC-CA monophasé	86
3.4.2.2	Modélisation rotative du convertisseur CC-CA monophasé	87
3.5	Implications pratiques pour le contrôle du convertisseur	87
3.6	Conclusion	88
 CHAPITRE 4 CONCEPTION DU CONTRÔLEUR POUR LE CONVERTISSEUR CC-CA MONOPHASÉ DANS LE RÉFÉRENTIEL ROTATIF		
4.1	Introduction	91
4.2	Contrôleur PI	92
4.3	Commande vectorielle des convertisseurs CC-CA monophasé : mode autonome ...	94
4.3.1	Contrôle du courant	95
4.3.1.1	Structure du contrôle du courant	96
4.3.1.2	Conception du contrôleur PI pour le contrôle du courant	97
4.3.2	Contrôle de la tension	99
4.3.2.1	Structure du contrôle de la tension	101
4.3.2.2	Conception du contrôleur PI pour le contrôle de la tension	102
4.4	Commande vectorielle des convertisseurs CC-CA monophasés : mode connecté au réseau	104
4.4.1	principes de base du contrôle connecté au réseau	104
4.4.1.1	Synchronisation avec le réseau électrique	105
4.4.1.2	Contrôle de la puissance active et réactive	105
4.4.1.3	Qualité de l'énergie fournie	105

4.4.2	Contrôle du courant	106
4.4.2.1	Structure du contrôle du courant	106
4.4.2.2	Conception du contrôleur PI pour le contrôle du courant	107
4.4.3	Synchronisation avec le réseau	109
4.4.3.1	Importance de la synchronisation	109
4.4.3.2	Techniques de synchronisation	110
4.4.3.3	Implémentation de la PLL pour la synchronisation	110
4.5	Conclusion	111

CHAPITRE 5 RÉSEAUX DE NEURONES ET OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES

5.1	Introduction	115
5.2	Réseau de neurones artificiels	116
5.2.1	Le neurone artificiel	117
5.2.2	Le Réseau de neurones artificiels	118
5.2.2.1	Structure des réseaux de neurones	120
5.2.2.2	Fonctions d'activation	121
5.2.3	Types de réseaux de neurones	125
5.2.3.1	Réseaux de neurones feedforward	125
5.2.3.2	Réseaux de neurones récurrents	126
5.2.3.3	Réseaux convolutifs	127
5.2.3.4	Réseaux de neurones génératifs adverses (GANs)	127
5.2.4	Phases des réseaux de neurones artificiels	128
5.2.4.1	Prétraitement des données	129
5.2.4.2	Phase d'apprentissage	130
5.2.4.3	Phase de validation	137
5.3	Optimisation par essaim de particules	140
5.4	Conclusion	144

CHAPITRE 6 TECHNIQUES DE CONTRÔLE DE STATISME POUR LES MICRO-RÉSEAUX

6.1	Introduction	147
6.2	Contrôle de statique en mode autonome	148
6.2.1	Contrôle de statique conventionnel	148
6.2.1.1	Principe fondamental	148
6.2.1.2	Contrôle de statisme pour réseau inductif	149
6.2.1.3	Contrôle de statisme pour réseau résistif	152
6.2.1.4	Cas Général d'impédance mixte	154
6.2.2	Technique de contrôle de statisme proposée	156
6.2.2.1	Principes fondamentaux et contributions	156
6.2.2.2	architecture du système de contrôle	157
6.2.2.3	Boucle de contrôle de partage de puissance	158
6.2.2.4	Contrôle de statisme par RNA	159
6.2.2.5	Optimisation par essaims particulières	161

6.2.2.6	Entraînement, test et validation du RNA	163
6.3	Contrôle de statisme en mode connecté au réseau	167
6.3.1	Contrôle de la puissance active	168
6.3.2	Contrôle de la puissance réactive	168
6.4	Conclusion	169
CHAPITRE 7 RÉSULTATS ET DISCUSSION		171
7.1	Introduction	171
7.2	Structure du micro-réseau	172
7.2.1	Structure à bus commun	173
7.2.2	Structure maillée	174
7.3	Types de charges	175
7.3.1	Charges linéaires	176
7.3.2	Charges non linéaires	177
7.4	Test de connexion/déconnexion des générateurs	178
7.5	Résultats et discussion	180
7.5.1	Structure à bus commun	180
7.5.1.1	Comportement du système avec charges linéaires	180
7.5.1.2	Comportement du système avec charges non-linéaires	185
7.5.1.3	Réponse du système lors de connexion/déconnexion	198
7.5.2	Structure maillée	203
7.5.2.1	Comportement du système avec charges non-linéaires	203
7.5.2.2	Comportement du système avec charges non-linéaires	209
7.5.2.3	Réponse du système lors de connexion/déconnexion	221
7.6	Conclusion	226
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		229
8.1	Contributions scientifiques majeures	231
8.1.1	Contributions théoriques	231
8.1.2	Contributions pratiques	232
8.1.3	Impact sur le domaine	233
8.2	Recommandations	233
8.2.1	Recommandations pour l'implémentation pratique	234
8.2.2	Recommandations pour l'optimisation des performances	235
8.2.3	Recommandations méthodologiques	236
8.3	Perspectives de recherche	237
8.3.1	Extensions immédiates	237
8.3.2	Développements méthodologiques avancés	239
8.3.3	Défis de recherche identifiés	240
8.4	Mot de la fin	241
BIBLIOGRAPHIE		243

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparaison des modèles de production centralisée et décentralisée ... 15
Tableau 2.1	État de commutation du MLI unipolaire et niveaux de tension correspondants 65
Tableau 7.1	Paramètres techniques du GED172
Tableau 7.2	Paramètres des impédances pour la structure à bus commun173
Tableau 7.3	Paramètres des impédances pour la structure maillée174
Tableau 7.4	Caractéristiques des charges linéaires176
Tableau 7.5	Caractéristiques des charges non linéaires177
Tableau 7.6	Protocole de test pour la connexion/déconnexion des générateurs179
Tableau 7.7	Résumé des résultats du TDH dans une structure à bus commun186
Tableau 7.8	Résumé des résultats du TDH dans une structure de réseau maillé220

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Comparatif entre la production décentralisée et la production centralisée 15
Figure 1.2	Schéma des composants et leur interaction dans un micro-réseau 19
Figure 1.3	Convertisseur de puissance formant un réseau 39
Figure 1.4	Convertisseur de puissance alimentant le réseau 40
Figure 1.5	Convertisseur de puissance soutenant un réseau en courant 42
Figure 1.6	Convertisseur de puissance soutenant un réseau en tension 43
Figure 2.1	Structure générale d'un convertisseur CC-CA 52
Figure 2.2	Schéma d'un convertisseur CC-CA MLI en demi-pont 57
Figure 2.3	Illustration du MLIS 58
Figure 2.4	Schéma d'un convertisseur CC-CA monophasé en pont complet 59
Figure 2.5	MLI bipolaire 62
Figure 2.6	MLI bipolaire 63
Figure 2.7	MLI unipolaire 66
Figure 2.8	MLI unipolaire 67
Figure 3.1	Schéma bloc du SOGI-QSG 74
Figure 3.2	Diagrammes de bode du SOGI-QSG 76
Figure 3.3	Résultats de l'implémentation du SOGI-QSG dans MATLAB/SIMULINK .. 77
Figure 3.4	Visualisation des composantes dq via matlab 81
Figure 3.5	Circuit d'un convertisseur CC-CA monophasé en mode autonome 83
Figure 3.6	Représentation dq du convertisseur CC-CA monophasé en interaction avec le réseau 85
Figure 3.7	Circuit d'un convertisseur CC-CA monophasé en mode réseau 86

Figure 4.1	Structure du contrôleur PI	93
Figure 4.2	Schéma du contrôle en cascade du convertisseur CC-CA monophasé dans le référentiel dq	94
Figure 4.3	Configuration du contrôle du courant dans le référentiel dq pour un convertisseur CC-CA monophasé	95
Figure 4.4	Schéma détaillé du contrôle du courant	96
Figure 4.5	Schéma détaillé du contrôle du courant	97
Figure 4.6	Configuration générale du contrôle de la tension pour un convertisseur CC-CA	100
Figure 4.7	Schéma détaillé du contrôle de la tension	101
Figure 4.8	Schéma détaillé du contrôle de la tension	102
Figure 4.9	Schéma du contrôle en cascade du convertisseur CC-CA monophasé dans le référentiel dq	103
Figure 4.10	Schéma détaillé du contrôle du courant pour le mode connecté	106
Figure 4.11	Structure typique d'une boucle à verrouillage de phase (PLL)	110
Figure 5.1	Schéma d'une cellule neuronale biologique	117
Figure 5.2	Neurone artificiel de McCulloch et Pitts	118
Figure 5.3	Schéma d'un RNA	119
Figure 5.4	Tracé de la fonction d'activation hardlim	121
Figure 5.5	Tracé de la fonction d'activation sigmoïde	122
Figure 5.6	Tracé de la fonction d'activation tangente hyperbolique	123
Figure 5.7	Tracé de la fonction d'activation softsign	124
Figure 5.8	Tracé de la fonction d'activation unité linéaire rectifiée (ReLU)	124
Figure 5.9	Exemple de la fonction d'erreur par rapport au gradient de poids pendant l'exécution de l'algorithme de rétropropagation	136
Figure 5.10	Déplacement d'une particule	141

Figure 6.1	Modèle simplifié d'un convertisseur de puissance connecté au réseau par une impédance de ligne148
Figure 6.2	Caractéristiques de statisme pour le réseau inductif 151
Figure 6.3	Schéma de contrôle de statisme pour réseau inductif 151
Figure 6.4	Caractéristiques de statisme pour le réseau résistif153
Figure 6.5	Schéma de contrôle de statisme pour réseau résistif153
Figure 6.6	Schéma de contrôle de statisme pour réseau à impédance mixte155
Figure 6.7	Structure du contrôle proposé pour convertisseur CC-CA monophasé .. 157
Figure 6.8	Structure détaillée de la boucle de contrôle de partage de puissance159
Figure 6.9	Architecture du RNA pour le contrôle de statisme160
Figure 6.10	Résultats de l'optimisation par OEP pour les tensions de référence163
Figure 6.11	Méthodologie de division des données pour l'évaluation du RNA165
Figure 6.12	Analyse comparative des performances des RNAs166
Figure 6.13	Architecture du contrôle de statisme en mode connecté 167
Figure 6.14	Caractéristique du contrôle de puissance active168
Figure 6.15	Caractéristique du contrôle de puissance réactive169
Figure 7.1	Schéma de la structure à bus commun173
Figure 7.2	Schéma de la structure maillée174
Figure 7.3	Configuration des charges linéaires dans le micro-réseau176
Figure 7.4	Configuration des charges non linéaires dans le micro-réseau177
Figure 7.5	Résultats de la simulation pour une ligne inductive 181
Figure 7.6	Résultats de la simulation pour une ligne résistive182
Figure 7.7	Résultats de la simulation pour une ligne mixte183

Figure 7.8	Résultats de la simulation de la tension aux borne de la charge non-linéaire pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)	188
Figure 7.9	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	189
Figure 7.10	Comparaison entre le contrôle par statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	190
Figure 7.11	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	191
Figure 7.12	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	192
Figure 7.13	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	193
Figure 7.14	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	194
Figure 7.15	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	195
Figure 7.16	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	196
Figure 7.17	Comparaison entre le contrôle par statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	197
Figure 7.18	Tension de charge lors de la connexion/déconnexion pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)	199
Figure 7.19	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	200
Figure 7.20	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	201
Figure 7.21	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	202
Figure 7.22	Résultats de la simulation de la tension aux bornes de la charge non-linéaire pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)	205

Figure 7.23	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	206
Figure 7.24	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	207
Figure 7.25	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	208
Figure 7.26	Résultats de la simulation des tensions pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)	209
Figure 7.27	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	210
Figure 7.28	Analyse spectrale pour une ligne inductive avec charge NL1	211
Figure 7.29	Analyse spectrale pour une ligne inductive avec charges NL1 + NL2 ...	212
Figure 7.30	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	213
Figure 7.31	Analyse spectrale pour une ligne résistive avec charge NL1	214
Figure 7.32	Analyse spectrale pour une ligne résistive avec charges NL1 + NL2	215
Figure 7.33	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	216
Figure 7.34	Analyse spectrale pour une ligne mixte avec charge NL1	217
Figure 7.35	Analyse spectrale pour une ligne mixte avec charges NL1 + NL2	218
Figure 7.36	Tension de charge lors de la connexion/déconnexion pour différentes configurations de ligne	222
Figure 7.37	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive	223
Figure 7.38	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive	224
Figure 7.39	Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte	225

INTRODUCTION

La transition énergétique s'impose aujourd'hui comme l'un des défis majeurs du XXI^e siècle. Dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat, la communauté internationale s'est engagée à limiter le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C, ce qui nécessite une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (2024), la demande mondiale d'électricité devrait augmenter de près de 50 % d'ici à 2040, exerçant une pression accrue sur les infrastructures et sur les ressources fossiles, en voie d'épuisement. Cette évolution, conjuguée à l'urgence environnementale, exige une transformation profonde des modes de production et de distribution de l'énergie.

La transition mondiale vers des systèmes énergétiques durables est de plus en plus motivée par l'intégration de sources d'énergie renouvelable (SEnR) et par le développement de réseaux électriques intelligents (REI). En 2022, plus de 80 % des nouvelles capacités de production électrique installées dans le monde provenaient de sources renouvelables selon le rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie (2022). Cette croissance rapide favorise la décentralisation progressive du système électrique, qui évolue d'une architecture centralisée traditionnelle vers une organisation distribuée intégrant de multiples sources à différentes échelles.

Les micro-réseaux (MR), en tant que composantes clés des REI, jouent un rôle essentiel dans la gestion des ressources énergétiques décentralisées. En intégrant diverses unités de génération d'énergie distribuées (GED), des systèmes de stockage d'énergie, des dispositifs de conversion, des équipements de protection et des charges, les MR offrent des solutions efficaces pour gérer la variabilité et l'intermittence associées aux SEnR Mehta & Basak (2021); Espina *et al.* (2020); Bevrani, Francois & Ise (2017b); Bouzid *et al.* (2015).

L'intégration de sources d'énergie variables et difficiles à prévoir soulève d'importants défis pour maintenir une distribution électrique stable et efficace Han, Li, Shen, Coelho & Guerrero (2017); Han *et al.* (2016). Les variations de tension, de fréquence et les problèmes de synchronisation

constituent des obstacles majeurs qu'il convient de maîtriser pour garantir la qualité de l'énergie et la continuité de service.

L'un des principaux problèmes de l'exploitation d'un MR concerne le contrôle dynamique de la tension et de la fréquence des unités GED. Ce contrôle s'appuie traditionnellement sur l'approche dite « contrôle de statisme », une méthode décentralisée qui s'adapte de manière autonome aux variations de charge en n'utilisant que des informations locales. Le principe fondamental de cette approche repose sur l'ajustement dynamique de la puissance de sortie de chaque unité GED en fonction des variations de tension et de fréquence mesurées localement, permettant ainsi une répartition naturelle de la charge entre les différentes unités. Cette méthode gère la répartition de la puissance active et réactive entre les unités GED, sans dépendre de liens de communication externes.

Les méthodes de contrôle de statisme conventionnel (CSC) présentent des performances variables selon le niveau de tension du réseau. Dans les réseaux haute tension, où les impédances de lignes de transmission sont principalement inductives, elles permettent de découpler efficacement la puissance active (P) de la fréquence (f) et la puissance réactive (Q) de la tension (V), via les caractéristiques ($P-f$) et ($Q-V$). Pour les réseaux moyenne tension, majoritairement résistifs, les caractéristiques ($P-V$) et ($Q-f$) s'avèrent plus adaptées.

Cependant, dans les MR basse tension, la situation se complexifie : les composantes inductives et résistives influencent simultanément les flux de puissance, créant un couplage entre les contrôles de puissance active et réactive. Cette impédance mixte limite significativement l'efficacité des méthodes CSC, entraînant des inexactitudes dans le partage de la puissance et une instabilité face aux charges variables.

De plus, les méthodes CSC présentent plusieurs limitations critiques :

- **Partage de puissance imprécis en raison des variations d'impédance de ligne :** Les variations d'impédance de ligne conduisent à des chutes de tension inégales et à un partage de puissance inexact entre les unités GED.
- **Déviations de tension et de fréquence lors des variations de charge :** Des coefficients de pente fixes ne peuvent s'adapter aux fluctuations soudaines de la demande, provoquant des déviations notables de tension et de fréquence, ce qui compromet la qualité de l'alimentation et la stabilité du système.
- **Adaptabilité limitée aux conditions de fonctionnement dynamiques :** Les méthodes traditionnelles ne sont pas capables d'ajuster leurs paramètres de contrôle en temps réel, ce qui les rend inefficaces lorsque les charges et la configuration du réseau évoluent.
- **Sensibilité aux charges non linéaires et aux harmoniques :** L'augmentation du taux de distorsion harmonique (TDH) résulte d'une gestion insuffisante des charges non linéaires, dégradant la qualité de l'alimentation.
- **Dépendance à des liens de communication :** Les améliorations requièrent souvent une communication entre les unités GED, réduisant la fiabilité du système, augmentant sa complexité et son coût.

Face à ces défis, les travaux présentés dans cette thèse développent une stratégie novatrice de contrôle de statisme qui se distingue des approches existantes par son architecture hybride plus adaptée aux MR. La méthode proposée combine un Réseau de Neurones Artificiels (RNA) avec un algorithme d'Optimisation par Essaim de Particules (OEP), offrant une solution adaptative pour les MR contenant des unités GED monophasées en parallèle.

Le choix d'une architecture hybride RNA-OEP répond spécifiquement aux défis des micro-réseaux modernes. L'utilisation du RNA permet une adaptation rapide aux variations de charge en temps réel, essentielle pour maintenir la stabilité du système face aux fluctuations des sources

renouvelables. L'OEP, quant à elle, offre une solution robuste pour l'optimisation des paramètres de contrôle, capable de gérer la nature non linéaire et multi-objectifs du problème. La séparation entre la phase d'optimisation hors ligne par OEP et la phase d'exploitation en temps réel par RNA constitue une innovation majeure, permettant de combiner l'optimalité des solutions avec la rapidité d'exécution nécessaire au contrôle en temps réel.

Les contributions scientifiques majeures de cette thèse s'articulent autour de quatre axes fondamentaux :

1. **Innovation Architecturale** : L'approche développée introduit une nouvelle architecture de contrôle hybride combinant RNA et OEP, spécifiquement conçue pour les convertisseurs CC-CA monophasés en parallèles. Cette architecture se distingue par sa capacité à gérer simultanément l'optimisation des paramètres de contrôle et l'adaptation dynamique aux variations de charge, avec une séparation claire entre optimisation hors ligne et contrôle temps réel.
2. **Amélioration des Performances** : La méthodologie proposée surmonte les limitations du contrôle de statisme conventionnel dans les réseaux basse tension. Les résultats démontrent une réduction significative des erreurs de partage de puissance, passant de 7% avec les méthodes conventionnelles à moins de 0,5% avec l'approche proposée, accompagnée d'une stabilisation remarquable des paramètres électriques.
3. **Robustesse Accrue** : L'architecture développée présente une robustesse exceptionnelle face aux variations d'impédance de ligne. Les tests en configuration maillée révèlent une réduction du TDH de 14,33% à 13,96% en présence de charges non linéaires, tout en maintenant une distribution optimale de la puissance.
4. **Autonomie Opérationnelle** : La méthodologie propose une solution innovante au problème de la dépendance aux communications, permettant une adaptation locale aux variations de charge sans infrastructure de communication complexe, tout en maintenant une performance globale optimale.

L'originalité de la méthode proposée réside dans l'utilisation complémentaires de ces deux techniques selon deux phases distinctes :

- **Phase d'entraînement :** Durant cette phase préparatoire, l'algorithme OEP est spécifiquement utilisé pour générer des valeurs de référence optimales de tension des axes dq . Cette optimisation permet de :
 - Compenser proactivement les effets des lignes de transmission
 - Anticiper les variations de charge
 - Générer un ensemble complet de données d'entraînement pour le RNA
- À la différence des approches antérieures, où l'OEP est utilisé pour optimiser les paramètres internes du RNA, la méthode proposée vise plutôt l'optimisation directe des variables de commande. Plus précisément, l'OEP permet de déterminer les points de fonctionnement optimaux appliqués aux tensions des axes dq , pour chaque point d'opération. Cette approche permet de constituer une base de données d'apprentissage riche en commandes optimales, adaptées à divers scénarios de fonctionnement
- **Phase d'exploitation en temps réel :** En exploitation, le RNA prend le relais pour :
 - Calculer rapidement les signaux de contrôle à partir des mesures instantanées
 - Ajuster dynamiquement les paramètres de contrôle
 - Assurer une réactivité optimale face aux variations du système

Cette séparation claire entre optimisation hors ligne et contrôle en temps réel constitue un avantage majeur : les coûts calculatoires de l'OEP n'impactent pas les performances opérationnelles du système.

L'approche proposée, combinant RNA et OEP, nécessite une démarche structurée et méthodique pour sa conception et sa validation.

Les travaux de recherche s'articulent autour de trois objectifs principaux :

1. **Analyse et modélisation des micro-réseaux** : Élaborer des modèles dynamiques détaillés englobant convertisseurs de puissance, filtres, impédances de ligne, charges et systèmes de stockage.
2. **Développement d'une stratégie de contrôle innovante** : Concevoir un contrôleur neuronal adaptatif optimisé par OEP pour le contrôle en temps réel des MRs.
3. **Validation et évaluation comparative** : Mettre en œuvre des simulations détaillées pour comparer la performance du contrôleur proposé avec les méthodes conventionnelles.

La méthodologie adoptée se décompose en trois phases distinctes :

- **Étude bibliographique et analyse théorique** : Examen critique des architectures de MRs et des stratégies de contrôle actuelles.
- **Conception du contrôleur** : Développement de l'architecture neuronale et implémentation de l'algorithme OEP, en tenant compte des contraintes système.
- **Validation numérique** : Réalisation de simulations exhaustives pour évaluer la robustesse et la précision du contrôleur développé.

La présente thèse s'articule en huit chapitres, qui suivent une progression logique des concepts vers leur mise en œuvre pratique :

- **Chapitre 1** : Établissement du cadre théorique global, en proposant une analyse approfondie de la littérature scientifique relative aux Micro-Réseaux (MRs) et aux stratégies de contrôle associées. Cette section met en exergue les défis inhérents à l'intégration des énergies renouvelables ainsi que les contraintes de stabilité, de communication et de fiabilité qui en découlent.
- **Chapitre 2** : Examen critique des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) appliquées aux convertisseurs à courant continu–courant alternatif (CC–CA). Cette analyse permet d'identifier les limitations intrinsèques de ces techniques dans un contexte de Micro-

Réseaux caractérisés par une forte pénétration d'Énergies Nouvelles Renouvelables (ENR), justifiant ainsi l'élaboration de solutions présentant une flexibilité accrue.

- **Chapitre 3 :** Élaboration d'un cadre mathématique rigoureux pour la modélisation des Micro-Réseaux. Ce chapitre développe les équations fondamentales qui régissent les différents éléments constitutifs du système (convertisseurs, lignes de transmission, charges, dispositifs de stockage), en accordant une attention particulière aux interactions dynamiques entre ces composants.
- **Chapitre 4 :** Présentation détaillée de la conception du contrôleur monophasé dans le référentiel rotatif. Cette section expose les choix architecturaux effectués afin de satisfaire aux exigences précédemment identifiées dans les chapitres antérieurs.
- **Chapitre 5 :** Introduction approfondie aux réseaux de neurones artificiels et à l'optimisation par essaims particulaires, ces deux approches constituant le fondement de la stratégie de contrôle proposée (contrôleur CSRNA).
- **Chapitre 6 :** Analyse comparative entre les approches de contrôle de statisme conventionnelles et la stratégie novatrice proposée dans cette thèse. Cette comparaison met en lumière les insuffisances des méthodes classiques face aux exigences inhérentes à un Micro-Réseau moderne.
- **Chapitre 7 :** Validation numérique de la solution proposée. Les résultats des simulations, réalisées sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, font l'objet d'une analyse approfondie et sont comparés aux méthodes de référence, démontrant ainsi la valeur ajoutée du contrôleur CSRNA. Ce chapitre propose également une discussion critique des résultats obtenus, en soulignant leurs implications pratiques et en suggérant des axes d'amélioration potentiels. Les limitations du système ainsi que certaines perspectives de recherche y sont également abordées.
- **Chapitre 8 :** Formulation de la conclusion générale et ouverture sur les développements futurs envisageables, notamment l'extension de l'approche proposée à d'autres topologies de

réseaux et l'intégration potentielle de techniques d'Intelligence Artificielle complémentaires (logique floue, algorithmes génétiques, apprentissage par renforcement, etc.).

Les contributions scientifiques de cette thèse s'articulent autour de quatre axes principaux, chacun répondant à des problématiques spécifiques identifiées dans l'état de l'art :

1. **Développement d'une nouvelle stratégie de contrôle** : Une approche novatrice intégrant les méthodes d'intelligence artificielle et d'optimisation pour le contrôle efficace des Micro-Réseaux.
2. **Amélioration significative des performances** : Accroissement notable de l'efficacité énergétique, de la stabilité opérationnelle et de l'adaptabilité du système, sans nécessiter de dépendance aux infrastructures de communication.
3. **Résolution des défis techniques pratiques** : Gestion optimisée des problématiques liées aux variations d'impédance, aux fluctuations de charge et aux distorsions harmoniques inhérentes aux systèmes électriques complexes.
4. **Validation scientifique rigoureuse** : Démonstration quantitative, fondée sur des données empiriques, des avantages substantiels de l'approche proposée comparativement aux méthodes conventionnelles actuellement employées.

Les résultats de simulations démontrent la supériorité de l'approche proposée par rapport aux méthodes conventionnelles, avec des améliorations quantifiables dans plusieurs domaines clés :

- **Stabilité Améliorée** :
 - Réduction des déviations de tension à $\pm 0.2 \text{ V}$ autour de la valeur nominale (contre $\pm 5 \text{ V}$ pour le CSC)
 - Limitation des variations de fréquence à $\pm 0.15 \text{ Hz}$ (contre $\pm 0.4 \text{ Hz}$ pour le CSC)
 - Temps de stabilisation réduit de 40 % après perturbation

- **Qualité de l'Énergie Supérieure :**
 - Réduction du TDH de 14 % à 13 % en présence de charges non linéaires
 - Atténuation significative des harmoniques de rang élevé
 - Amélioration de la forme d'onde de tension en régime permanent
- **Partage de Puissance Optimisé :**
 - Erreur de répartition réduite à moins de 0.5 % (contre 7 % pour le CSC)
 - Distribution équilibrée entre les unités GED
 - Adaptation dynamique aux variations de charge

Ces performances, validées à travers des simulations exhaustives sous MATLAB/SIMULINK, démontrent le potentiel de l'approche hybride RNA-OEP pour améliorer significativement la stabilité et l'efficacité des micro-réseaux modernes. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution.

Les contributions mentionnées représentent des avancées significatives dans le domaine du contrôle des MRs, ouvrant la voie à des systèmes plus robustes et plus efficaces. Comme mentionné précédemment, le chapitre suivant expose un état de l'art détaillé des MRs et de leurs stratégies de contrôle, établissant ainsi le cadre théorique nécessaire à la compréhension des innovations proposées.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART ET DYNAMIQUE DES MICRO-RÉSEAUX

1.1 Introduction

La transition énergétique contemporaine constitue un défi paradigmatique pour les systèmes électriques, confrontés à la nécessité de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre tout en maintenant une alimentation électrique fiable et performante Abianeh, Mardani, Ferdowsi, Gottumukkala & Dragičević (2022); Brandao, Ferreira, Alonso, Tedeschi & Marafão (2020). Dans ce contexte, l'intégration croissante des unités de GED et le développement des réseaux électriques intelligents (REI) imposent une transformation profonde des architectures de production et de distribution électrique.

L'évolution vers des systèmes énergétiques décentralisés s'accompagne de défis techniques majeurs, particulièrement en matière de contrôle et de stabilité. La nature intermittente des SEnR, la bidirectionnalité des flux d'énergie et la multiplication des points de production et de consommation nécessitent des stratégies de contrôle sophistiquées. Ces stratégies doivent assurer non seulement la stabilité du système en régime permanent, mais aussi sa résilience face aux perturbations transitoires Li, Cheng, Si & Li (2022d); Golsorkhi & Savaghebi (2021); Pérez-Ibacache, Castro, Pimentel & Bizzo (2022).

Dans ce contexte, les MRs émergent comme une solution architecturale permettant d'intégrer efficacement les unités GED tout en assurant une gestion locale optimisée. Un MR se définit comme un système électrique local intégrant Abianeh *et al.* (2022); Mohiuddin & Qi (2022); Wan, Wen, Yu & Kurths (2024) :

- Des unités de GED de différentes natures (photovoltaïque, éolien, etc.)
- Des systèmes de stockage d'énergie pour la stabilisation et l'équilibrage
- Des convertisseurs de puissance assurant l'interface entre les composants
- Un système de contrôle hiérarchique pour la coordination de l'ensemble

La complexité de ces systèmes soulève des enjeux critiques en matière de contrôle, notamment :

- Le contrôle de tension et de fréquence dans différents modes opératoires
- La coordination des convertisseurs de puissance en parallèle
- La gestion des transitions entre les modes connecté et isolé
- L'optimisation des flux de puissance et la qualité de l'énergie

Ce chapitre propose une analyse approfondie de l'état de l'art des MRs, en mettant l'accent sur les stratégies de contrôle et leur mise en œuvre. L'objectif est d'examiner les différentes approches de contrôle, depuis le contrôle local des convertisseurs jusqu'à la coordination globale du système, pour identifier les problématiques technologiques et les perspectives d'amélioration.

La démarche adoptée s'articule autour de trois axes principaux :

1. L'analyse des architectures de contrôle hiérarchique, de leurs composants et de leurs interactions
2. L'étude des stratégies de contrôle pour les différents modes opératoires
3. L'évaluation des techniques avancées de contrôle, notamment celles basées sur l'intelligence artificielle

Cette analyse constitue le socle théorique pour le développement de nouvelles approches de contrôle, plus particulièrement la stratégie hybride combinant RNA et OEP qui sera développée dans les chapitres suivants.

1.2 Définition et évolution des micro-réseaux

Les MRs représentent un nouveau besoin majeur dans l'architecture des systèmes électriques contemporains, rompant avec le modèle traditionnel centralisé pour adopter une approche davantage flexible et distribuée. Leur émergence résulte principalement de l'essor des SEnR, du besoin de renforcer la résilience des réseaux et de la recherche de meilleures performances économiques et environnementales. La présente section propose tout d'abord une définition des MRs et de leurs concepts fondamentaux, puis compare ce nouveau modèle au schéma centralisé.

Enfin, elle met en évidence leur contexte historique et leurs caractéristiques structurantes, avant d'aborder les défis liés à ce type d'architecture réseau.

1.2.1 Définition et concepts fondamentaux

Un MR peut être défini comme un système électrique local qui regroupe simultanément des unités de GED, des dispositifs de stockage et des charges diverses (résidentielles, industrielles, etc.). Son originalité repose sur la capacité à fonctionner en mode connecté au réseau principal ou en mode isolé, procurant une flexibilité opérationnelle notable. Cette dualité de fonctionnement permet d'optimiser l'utilisation des ressources locales et impose une architecture de contrôle adaptée à chaque situation.

1.2.1.1 Définitions dans la littérature

Plusieurs organismes et travaux de recherche ont établi des définitions complémentaires des MRs, chacun mettant l'accent sur une dimension particulière :

- **Département d'Énergie des États-Unis (DOE) :** insiste sur « un réseau local d'énergie intégrant des unités de GED et des charges locales, capable de fonctionner en mode connecté ou isolé afin d'offrir un niveau de fiabilité et de résilience adapté aux besoins ».
- **Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) :** valorise l'agrégation et la flexibilité de contrôle, considérant le MR comme « une agrégation de charges et de microsources fonctionnant de manière coordonnée, fournissant à la fois puissance et chaleur via une gestion unifiée ».
- **Projets de recherche européens :** décrivent les MRs comme « des systèmes de distribution basse tension intégrant des unités de GED, du stockage et des charges pilotables, exploitables aussi bien en mode connecté qu'isolé ».

1.2.1.2 Attributs essentiels

Malgré la variété des approches, ces définitions convergent vers plusieurs caractéristiques fondamentales :

1. **Autonomie énergétique territoriale** : capacité à satisfaire, de manière durable ou transitoire, l'ensemble des besoins énergétiques internes grâce à un dispositif intégré de production et de stockage local, garantissant une indépendance opérationnelle mesurable.
2. **Flexibilité opérationnelle** : capacité de basculer aisément d'un fonctionnement en mode connecté à un fonctionnement en mode isolé, assurant la continuité de service.
3. **Intégration de SEnR** : pénétration élevée de sources solaires, éoliennes ou autres, nécessitant une gestion fine de la variabilité et un contrôle avancé.
4. **Gestion dynamique et coordonnée** : coordination étroite entre sources, stockage et charges pour maintenir l'équilibre du système, notamment lors de variations rapides.
5. **Stabilité et résilience** : en mode isolé, la stabilité tension/fréquence dépend en grande partie du pilotage autonome du MR, qui s'appuie sur des algorithmes de contrôle robustes.

Ces attributs rendent les MRs particulièrement adaptés à la décarbonation et à la modernisation des systèmes énergétiques, en assurant une solution locale, modulable et hautement fiable lorsqu'ils sont connectés au réseau principal Liu, Zhang, Shahidehpour, Zhou & Ding (2022a); Jabr (2022); Heins, Joševski, Karthik Gurumurthy & Monti (2023).

1.2.1.3 Comparaison avec le modèle centralisé

La Table 1.1 met en évidence les différences majeures entre le modèle de production historiquement centralisé et la production décentralisée typique des MRs, tandis que la figure 1.1 présente une vue synthétique. De manière générale, la décentralisation s'accompagne d'une diminution des pertes de transport et d'une meilleure intégration des SEnR, tout en renforçant la résilience face aux perturbations sur le réseau Guo, Qi, Yu, Frey & Tang (2021); Watson, Ojo, Laib & Lestas (2021); Hu *et al.* (2024); Zhang *et al.* (2024a).

Tableau 1.1 Comparaison des modèles de production centralisée et décentralisée

Production Centralisée	Production Décentralisée
Grandes centrales éloignées des consommateurs	Production à proximité des consommateurs
Réseau de transport unidirectionnel	Flux d'énergie bidirectionnels
Forte dépendance aux combustibles fossiles	Intégration massive des SEnR
Pertes de transmission élevées	Pertes de transport réduites
Faible résilience face aux perturbations	Système plus résilient et adaptable
Contrôle essentiellement centralisé	Gestion distribuée et intelligente

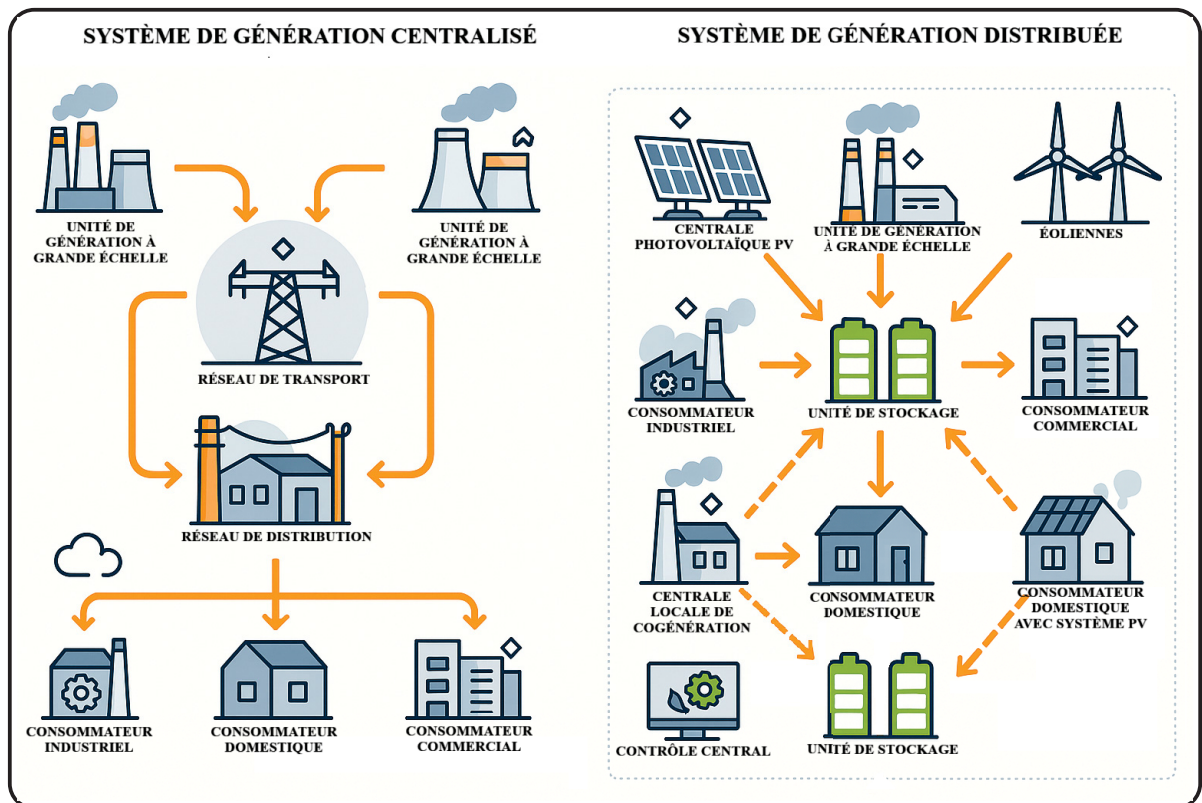


Figure 1.1 Comparatif entre la production décentralisée et la production centralisée

1.2.1.4 Avantages du modèle décentralisé

L'essor des SEnR et la demande croissante de résilience expliquent l'intérêt grandissant pour les architectures décentralisées. Les principaux avantages incluent :

- **Réduction des pertes de transmission** : la proximité entre la production et la consommation diminue significativement les pertes en ligne, améliorant ainsi le rendement global du système.
- **Robustesse accrue** : la possibilité de détacher rapidement un MR du réseau principal et de le faire fonctionner en mode autonome maintient l'alimentation même en cas de panne générale.
- **Souplesse d'intégration des renouvelables** : l'adaptation aux fluctuations solaires et éoliennes se trouve facilitée par un pilotage local et une gestion coordonnée.
- **Gestion locale adaptative** : un contrôle fin et distribué autorise l'optimisation, en temps réel, de la production, du stockage et de la consommation.

1.2.2 Contexte historique

L'évolution des MRs peut être découpée en trois grandes étapes, reflétant à la fois l'avancée des technologies et l'intérêt accru pour les solutions énergétiques distribuées :

1. **Phase initiale (fin du XXe siècle)** : Les premiers MRs ont émergé dans des zones isolées (régions rurales, sites industriels ou militaires), où la connexion au réseau était jugée trop onéreuse ou techniquement complexe. Ces démonstrateurs reposaient souvent sur des infrastructures expérimentales et un soutien institutionnel limité.
2. **Période de développement (2000–2010)** : D'importantes avancées technologiques ont été enregistrées au cours de cette décennie :
 - **Électronique de puissance** : amélioration notable des IGBT, MOSFET et convertisseurs bidirectionnels, rendant la conversion d'énergie plus fiable et plus efficace.
 - **Stockage électrochimique** : généralisation des batteries lithium-ion, plus performantes et moins coûteuses, offrant un stockage mieux maîtrisé.

- **Communication et contrôle** : mise en place de protocoles spécifiques (IEC 61850, etc.) et de premiers systèmes de supervision (SCADA), favorisant une gestion intelligente des flux d'énergie.

Cette période se caractérise par une fiabilité et une performance accrues des MRs.

3. **Phase d'intégration (2010–2020)** : La montée en puissance des SEnR s'est accompagnée de projets de grande échelle, démontrant l'intérêt technique et économique des MRs. Les progrès dans le domaine de la gestion énergétique (Energy Management Systems, EMS) et l'émergence de nouveaux modèles d'affaires (agrégation, communautés énergétiques) ont confirmé la pertinence de ces systèmes distribués dans le contexte de la transition énergétique.

1.2.3 Caractéristiques fondamentales

Au-delà de la capacité à intégrer diverses sources de production (renouvelables ou conventionnelles), les MRs se distinguent par un ensemble de propriétés qui leur confèrent un rôle central dans l'évolution des réseaux électriques :

- **Autonomie et résilience** : le fonctionnement en mode isolé (îlotage) assure un approvisionnement stable, même en l'absence de réseau principal.
- **Optimisation locale** : la gestion coordonnée de la production, du stockage et de la consommation limite les pertes et les coûts, tout en maximisant l'efficacité énergétique.
- **Flexibilité opérationnelle** : la commutation quasi-transparente entre modes connecté et isolé protège le MR contre les fluctuations du réseau principal et en garantit la continuité de service.
- **Réduction des pertes** : la proximité entre sources et charges diminue considérablement les pertes de transport.
- **Qualité de service améliorée** : la maîtrise locale de la tension et de la fréquence contribue à contenir les perturbations et à offrir une alimentation plus stable aux consommateurs.

1.2.4 Défis structurels

Malgré le fort intérêt suscité par les MRs, leur déploiement à grande échelle reste freiné par plusieurs défis techniques, économiques et réglementaires :

- **Complexité de pilotage** : la coordination simultanée de multiples unités de production, de stockage et de charges exige des algorithmes de contrôle sophistiqués ainsi qu'un réseau de communication performant.
- **Modèles économiques incertains** : l'investissement initial (infrastructures, stockage, dispositifs de contrôle) suppose des montages financiers innovants, avec une rentabilité à évaluer sur le long terme.
- **Gestion des flux bidirectionnels** : l'inversion potentielle du sens de circulation de l'énergie impose de nouvelles méthodes de protection et de supervision.
- **Interopérabilité et standardisation** : la multiplicité des normes techniques et réglementaires complique l'intégration des MRs, appelant à une harmonisation progressive.
- **Cybersécurité** : l'extension des dispositifs de contrôle et de communication accroît la surface d'attaque, imposant une vigilance accrue en matière de sécurité informatique.

L'étude des briques technologiques et des dispositifs de conversion essentiels à la mise en œuvre d'un MR sera approfondie dans les sections suivantes. Une telle analyse vise à mieux comprendre les stratégies de pilotage et de coordination permettant de lever les obstacles mentionnés et d'affermir la place des MRs dans la modernisation des réseaux électriques.

1.3 Architecture physique et composants

La conception d'un MR repose sur l'agencement cohérent de plusieurs blocs technologiques, assurant chacun un rôle spécifique dans la production, le stockage, la conversion et le contrôle de l'énergie. Quatre éléments structurels se distinguent particulièrement : les unités de GED, les systèmes de stockage, l'infrastructure de conversion et le système de contrôle. La présente section décrit successivement ces composants, puis met en lumière les principaux défis techniques et opérationnels associés à leur intégration.

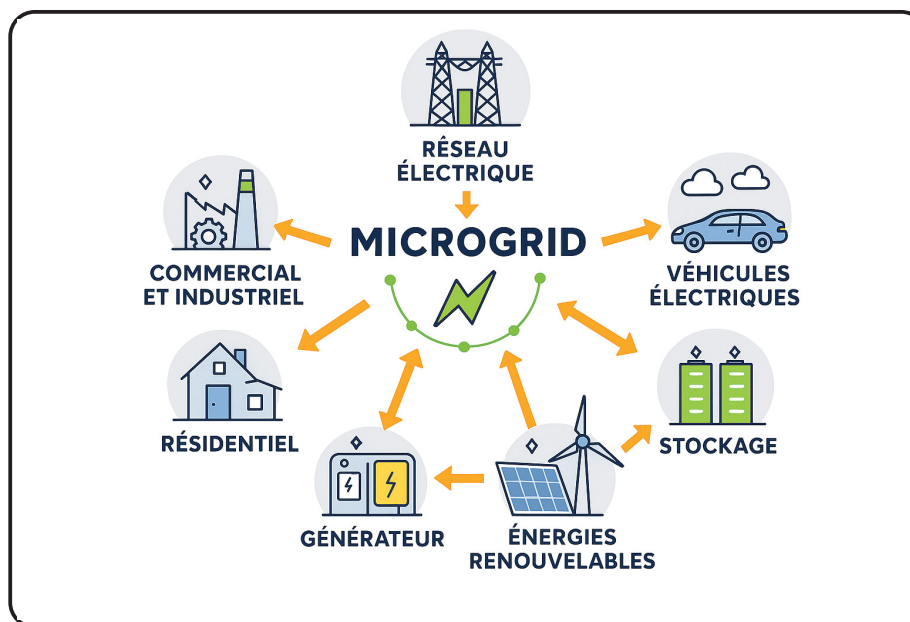


Figure 1.2 Schéma des composants et leur interaction dans un micro-réseau

1.3.1 Unités de génération d'énergie distribuées

Les unités de GED constituent le cœur de la production dans un MR. Elles se divisent en deux grandes catégories, en fonction de la source énergétique mise en œuvre.

1.3.1.1 Sources renouvelables

Les SEnR incluent notamment les installations photovoltaïques (associées à des convertisseurs DC/AC), les éoliennes (dotées de dispositifs de conversion électromécanique), ainsi que d'autres ressources adaptées au contexte local (biomasse, hydroélectricité, etc.) Guo *et al.* (2021); Watson *et al.* (2021); Liu *et al.* (2022a). Le caractère intermittent de ces sources entraîne divers impératifs :

- **Contrôle adapté** : requise afin de maintenir la qualité de la tension et de la fréquence en dépit des fluctuations de production.
- **Stockage indispensable** : destiné à compenser les variations rapides (par exemple, les aléas météorologiques) et à assurer la continuité de service.

- **Dimensionnement contextualisé** : établi en fonction des profils locaux de vent ou d'ensoleillement, afin d'optimiser l'exploitation des ressources.

1.3.1.2 Sources conventionnelles

Les unités de type conventionnel, telles que les microturbines à gaz, les groupes électrogènes diésel ou les piles à combustible, fournissent une production plus stable et pilotable. Leur présence permet souvent de pallier l'intermittence des SEnR. Les principaux atouts et contraintes sont résumés ci-dessous :

- **Production stable** : apte à maintenir un niveau de puissance constant, contribuant activement à la contrôle du MR.
- **Rôle de secours** : démarrage rapide envisageable lors d'une baisse soudaine de la production renouvelable.
- **Dépendance aux combustibles fossiles** : émission potentielle de CO₂ ou d'autres polluants, nécessitant une attention particulière aux impacts environnementaux Naderi *et al.* (2020); Feng & Zhang (2020); Qian, Liu, Zhang, Tang & Shahidehpour (2020).

1.3.2 Systèmes de stockage

Le recours à divers dispositifs de stockage énergétique vise à garantir un équilibre permanent entre l'offre et la demande, quelles que soient les conditions d'exploitation. Chaque technologie se caractérise par des spécificités en termes de puissance et de capacité de stockage.

1.3.2.1 Stockage électrochimique

Majoritairement constitué de batteries lithium-ion (ou à flux), ce type de stockage offre une capacité significative pour des durées allant de quelques minutes à plusieurs heures. Parmi les avantages majeurs :

- **Flexibilité opérationnelle** : la charge et la décharge s'ajustent rapidement aux fluctuations de production ou de consommation.

- **Stabilisation du MR** : le lissage des variations de puissance injectée contribue à réduire les écarts de tension et de fréquence.
- **Évolutivité** : les améliorations constantes en matière de densité énergétique, de coût et de durée de vie favorisent une intégration accrue à moyen et long terme Hu *et al.* (2024); Zhang *et al.* (2024a).

1.3.2.2 Stockage à haute puissance

D'autres solutions, comme les supercondensateurs ou les volants d'inertie, se révèlent indispensables pour réguler les fluctuations de très courte durée :

- **Réactivité élevée** : un temps de réponse très court, essentiel pour compenser les creux et les pics de production ou de consommation.
- **Stabilisation fréquentielle** : participation efficace au maintien d'une fréquence stable dans le MR, notamment en cas de forte variabilité.
- **Synergie avec les batteries** : la combinaison (batteries + supercondensateurs) rassemble la grande capacité d'énergie des premières et la réactivité des secondes Cao, Ma, Wang, Tolbert & Xue (2020); Lu, Liu, Savaghebi, Hou & Wang (2022).

1.3.3 Infrastructure de conversion

Les convertisseurs de puissance assurent l'interface entre les ressources du MR (sources et stockage) et, le cas échéant, le réseau principal. Le rôle de ces dispositifs se révèle essentiel pour la qualité de l'alimentation, la stabilité du MR et la sécurisation des échanges de puissance.

1.3.3.1 Convertisseurs sources de tension (VSI)

Les VSI peuvent remplir plusieurs fonctions, en fonction du mode de fonctionnement adopté :

- **Formateurs de réseau (Grid-Forming)** : assurent la contrôle tension/fréquence et constituent la référence pour l'ensemble du MR, notamment en mode isolé.

- **Injection de puissance active et réactive** : soutiennent la tension et la fréquence du réseau principal (mode connecté) ou du MR (mode isolé).
- **Support aux services systèmes** : réalisent le contrôle secondaire ou le filtrage des harmoniques (via des filtres actifs), entre autres.

1.3.3.2 Filtres et protections

Des filtres (LCL, LC) et des dispositifs de protection (sectionneurs, disjoncteurs, etc.) sont intégrés afin de préserver la qualité de l'onde et de protéger les équipements les plus sensibles. Leurs missions principales s'articulent autour de :

- **Réduction des harmoniques** : limitation du *TDH* pour se conformer aux normes de qualité de l'alimentation.
- **Protection des composants** : prévention des surintensités, surtensions et défauts de circulation de courant.
- **Sécurité du réseau** : interruption sélective en cas de défaut pour isoler rapidement la zone concernée et éviter la propagation d'incidents Wang, Deng, Liu, Xu & Dai (2021); Eajal *et al.* (2021).

1.3.4 Architecture de contrôle

Une structure de contrôle hiérarchisée est mise en place afin de garantir un fonctionnement stable et efficace du MR, en conciliant réactivité locale et vision d'ensemble. Deux niveaux sont généralement considérés, même si des étages supplémentaires (contrôle secondaire, tertiaire, etc.) peuvent exister :

1.3.4.1 Contrôle local

Chaque source (renouvelable ou conventionnelle) et chaque dispositif de stockage sont équipés d'algorithmes de contrôle (tension/fréquence, flux de puissance active et réactive, etc.) ainsi que de mécanismes de protection. Les interventions se font à des échelles de temps courts (de

la milliseconde à la seconde) afin de réagir instantanément aux évolutions de la charge ou de l'ensoleillement Li *et al.* (2022d); Golsorkhi & Savaghebi (2021).

1.3.4.2 Contrôle centralisé

Ce niveau supérieur consolide l'ensemble des informations (puissances injectées, états de charge, tensions, etc.) et coordonne les ressources pour optimiser la gestion du MR. Les actions couvrent notamment :

- **Transition entre modes** : passage précis du mode connecté au mode isolé et inversement, afin de limiter les transitoires et d'éviter les perturbations excessives.
- **Planification de la production et du stockage** : prise en compte des prévisions de consommation et de production renouvelable pour adapter les consignes.
- **Répartition optimale de la puissance** : arbitrage économique et technique visant à réduire les coûts et à améliorer la fiabilité.

Cette structuration hiérarchique confère au MR un fonctionnement à la fois sûr et performant, quelles que soient les conditions d'exploitation.

1.3.5 Défis techniques et opérationnels

L'essor des MRs reste soumis à des défis multiples, portant aussi bien sur la stabilité du système que sur la gestion de l'intermittence. Une synergie étroite entre la conception des composants et l'architecture de contrôle est nécessaire dès les premières étapes du projet afin de relever ces enjeux.

1.3.5.1 Stabilité et qualité de l'onde

La maîtrise de la tension et de la fréquence, surtout en mode isolé, requiert des algorithmes de contrôle robustes. Les défis majeurs incluent :

- **Gestion des transitoires** : le passage en mode îloté ou la reconnexion au réseau peuvent engendrer des perturbations importantes, nécessitant une synchronisation minutieuse.

- **Variation de la charge** : les fluctuations rapides de la demande doivent être compensées pour éviter des écarts excessifs de tension ou de fréquence.
- **Qualité de l'onde** : la présence d'harmoniques et de déséquilibres impose une supervision permanente et l'emploi de filtres ou de dispositifs correcteurs adaptés.

1.3.5.2 Gestion de l'intermittence

La forte présence de SEnR complique la planification et le pilotage du MR. Différentes approches se distinguent :

- **Prévision météorologique** : recours à des modèles et algorithmes de prédiction pour anticiper les variations d'ensoleillement ou de vent.
- **Stockage adapté** : dimensionnement et contrôle intelligents (charge/décharge) permettant de lisser la production et de faire face aux pics de consommation.
- **Coordination globale** : mise en œuvre d'un système de gestion énergétique (EMS) afin d'ajuster en temps réel les flux de puissance entre les différentes unités.

En définitive, la conception et la conduite d'un MR exigent une approche intégrée, associant des solutions techniques solides (contrôle, stockage, protections) à des objectifs opérationnels (fiabilité, résilience, réduction des coûts). Les sections suivantes approfondissent les stratégies de contrôle et de supervision qui permettent de relever ces défis, confirmant ainsi la place des MRs dans la transition énergétique.

1.4 Modes opérationnels et transitions

Le fonctionnement d'un MR se caractérise par sa capacité à opérer selon différents modes, chacun étant associé à des enjeux et contraintes spécifiques. La gestion de ces modes, ainsi que le passage de l'un à l'autre, constitue un défi majeur pour assurer à la fois stabilité, continuité de service et performance économique. Dans cette section, le mode connecté au réseau principal est examiné en premier lieu, suivi de la transition vers le mode isolé, avant d'aborder les spécificités du fonctionnement en mode isolé et enfin la procédure de reconnexion.

1.4.1 Mode connecté au réseau principal

Lorsqu'il est connecté, le MR fonctionne en synchronisation avec le réseau principal, ce qui permet des échanges de puissance bidirectionnels. Dans ce contexte, la tension et la fréquence sont essentiellement imposées par le réseau, tandis que le MR ajuste ses injections de puissance active et réactive pour soutenir différents objectifs (économiques, techniques ou environnementaux).

Le contrôle en mode connecté repose sur un ensemble de mécanismes visant à maintenir la stabilité du MR tout en respectant les contraintes imposées par le réseau. Les convertisseurs de puissance se comportent alors comme des sources de courant contrôlées, en veillant au respect des valeurs de consigne de puissance active et réactive. Parmi les paramètres critiques à surveiller, les suivants sont distingués :

- **Synchronisation de phase** : l'écart de phase entre le MR et le réseau principal doit rester inférieur à 1° pour éviter tout déséquilibre ou surtension.
- **Facteur de puissance** : il est souvent exigé qu'il soit supérieur à 0.95 au point d'interconnexion afin de limiter les échanges de puissance réactive inutiles.
- **Qualité spectrale** : le contenu harmonique des courants injectés doit être inférieur à 5% pour minimiser les perturbations sur le réseau.
- **Niveaux de tension** : au point de couplage, la tension doit se maintenir dans une plage de $\pm 5\%$ autour de la valeur nominale pour éviter tout risque de détérioration d'équipement.

Sur le plan du contrôle, plusieurs niveaux de contrôle sont distingués :

1. **Contrôle des flux de puissance** : il s'agit d'optimiser les échanges avec le réseau principal en tenant compte de l'autoconsommation locale, de la stabilité globale et des contraintes de capacité.
2. **Contrôle des convertisseurs** : ce volet englobe des fonctions telles que la synchronisation via Phase-Locked Loop (PLL), la compensation d'harmoniques et la limitation dynamique des courants Gupta, Doolla, Chatterjee & Pal (2021); Deng, Chen, Lu, Zheng & Mei (2021).

L'objectif global est donc d'assurer un fonctionnement stable tout en maintenant une flexibilité suffisante pour répondre à d'éventuelles variations de charge ou de production.

1.4.2 Transition vers le mode isolé

La transition du mode connecté vers le mode isolé constitue un évènement critique au cours duquel le MR doit rapidement assumer le rôle de source principale de tension et de fréquence. Un décalage ou une rupture brutale dans l'alimentation peuvent engendrer des perturbations dommageables, d'où la nécessité de procédures de détection et de basculement rapides.

Le processus de transition s'organise généralement en deux phases successives :

1. **Phase de détection** : le MR surveille en continu les paramètres réseau (tension, fréquence, déséquilibres éventuels) pour détecter des conditions anormales. Cette détection doit être suffisamment rapide (typiquement $< 10\text{ ms}$) pour réduire le risque de perturbation majeure.
2. **Phase d'exécution** : une fois la décision de transition validée, les convertisseurs basculent en mode « tension », les contrôles autonomes s'activent et les références de tension et de fréquence sont ajustées pour stabiliser immédiatement la zone isolée.

Afin de protéger aussi bien les équipements que les usagers, plusieurs mécanismes de protection sont mis en œuvre. Ceux-ci se divisent en général en deux catégories :

- **Protections matérielles** : elles incluent, entre autres, des limiteurs de courant rapides, des systèmes de coupure sélective et des dispositifs de protection contre les surtensions transitoires.
- **Protections logicielles** : elles englobent les algorithmes de détection de défauts, la coordination des séquences de déstagement et la supervision temps réel des états du système.

Grâce à cette approche systémique, la continuité de service et l'intégrité des équipements sont préservées.

1.4.3 Mode isolé

Le mode isolé requiert que le MR assure de façon autonome le contrôle de la tension et de la fréquence, en tenant compte des fluctuations de la charge et de la production locale (systèmes de stockage, SEnR, etc.). Il s'agit d'un mode de fonctionnement particulièrement exigeant, qui

réclame un pilotage fin des ressources énergétiques afin d'éviter les écarts de tension et de fréquence susceptibles de détériorer les appareils ou de provoquer des coupures.

Lorsque le MR est isolé, le contrôle se subdivise généralement en deux étages complémentaires :

- **Contrôle primaire (V/f) :** les convertisseurs formateurs de tension gèrent la consigne de tension et de fréquence, avec des mécanismes de partage de charge (statisme), de compensation des déséquilibres et d'inertie virtuelle pour lisser les transitoires rapides.
- **Contrôle secondaire :** elle vise à restaurer la fréquence nominale et à optimiser les tensions nodales, notamment via l'équilibrage des puissances réactives et la coordination des ressources de production et de stockage.

Dans un contexte isolé, l'équilibre entre l'offre et la demande en électricité est crucial pour la stabilité du MR. Les stratégies d'équilibrage comprennent généralement :

1. **Prévision de la charge :** de courtes échelles de temps sont souvent considérées pour anticiper les pics et ajuster la production ou le stockage.
2. **Gestion optimisée du stockage :** le stockage peut servir à absorber les excédents ou à fournir de la puissance de pointe en cas de déficit.
3. **Contrôle prédictif :** basé sur la modélisation des profils de charge et de production, il permet de gérer les ressources énergétiques de façon proactive.
4. **Délestage sélectif :** en ultime recours, certaines charges non critiques peuvent être temporairement déconnectées pour maintenir la stabilité du système.

Cette combinaison de mesures et de contrôles assure un fonctionnement fiable et continu du MR en mode isolé, même face à des variations imprévues de la demande ou de la production.

Lorsque les conditions du réseau principal redeviennent normales, la reconnexion du MR doit se faire de manière synchronisée et coordonnée. Cette étape se révèle également délicate, car un désalignement de tension, de fréquence ou de phase peut engendrer des surtensions ou des courants de pointe susceptibles de mettre en danger les équipements.

La synchronisation doit respecter des seuils stricts pour prévenir tout choc électrique. Généralement, des seuils stricts sont imposés :

- Un écart de tension inférieur à 3%,
- Un écart de fréquence inférieur à 0.1 Hz,
- Un déphasage inférieur à 3°,
- Une séquence de phases identique entre le MR et le réseau.

1.4.3.1 Processus de reconnexion

La reconnexion suit alors une séquence précise pour garantir une intégration progressive du MR dans le réseau :

1. **Vérification des conditions préalables** : il s'agit de s'assurer que le MR est prêt à se resynchroniser, et que le réseau principal est stable.
2. **Synchronisation fine** : les paramètres (tension, fréquence, phase) sont ajustés avant la fermeture du disjoncteur d'interconnexion.
3. **Reconnexion progressive** : dans certains cas, la puissance transférée est augmentée pas à pas pour éviter les à-coups.
4. **Transition des modes de contrôle** : les convertisseurs repassent en mode « courant » une fois la reconnexion achevée, afin de s'aligner sur les consignes du réseau principal.

En somme, la maîtrise de ces différents modes opérationnels (connecté, isolé) et de leurs transitions (bascule en mode isolé, reconnexion) est cruciale pour garantir la fiabilité et la performance des MRs. Les sections suivantes approfondiront l'architecture de contrôle et les approches de supervision permettant de gérer efficacement l'ensemble de ces scénarios de fonctionnement.

1.5 Architectures de contrôle

L'efficacité et la fiabilité d'un MR dépendent étroitement de la stratégie de contrôle mise en place. Dans cette section, les différentes approches d'architecture de contrôle, depuis le modèle

centralisé jusqu'aux systèmes hybrides, en soulignant leurs avantages, leurs inconvénients et leurs domaines d'application sont passées en revue.

1.5.1 Approche centralisée

Une architecture de contrôle centralisée s'appuie sur une entité unique qui supervise et coordonne l'ensemble des composants du MR. Dans ce schéma, l'unité centrale dispose d'une vision globale et agit comme un « chef d'orchestre » : elle reçoit en temps réel les informations relatives à l'état du réseau (tension, fréquence, charge, production, etc.) et envoie des consignes de contrôle aux différentes unités.

Le système centralisé s'articule autour d'une unité de traitement principale, dotée de plusieurs fonctions clés :

- **Supervision globale du système** : collecte et traitement en temps réel des données, estimation de l'état du MR, détection et diagnostic des anomalies, et coordination des actions de contrôle.
- **Optimisation des performances** : répartition optimale de la puissance entre les différentes sources, gestion des contraintes opérationnelles, optimisation économique de l'exploitation et maximisation de l'efficacité énergétique Sadabadi, Sahoo & Blaabjerg (2021); Roos, Nguyen, Morren & Slootweg (2021).

Grâce à cette vue d'ensemble, le contrôleur central peut effectuer des arbitrages complexes (économiques, énergétiques, sécuritaires) et mettre en œuvre des stratégies globales pour maintenir l'équilibre du système.

Le choix d'une architecture centralisée présente certains avantages déterminants :

- **Vision globale** : la centralisation garantit une optimisation globale du MR et une gestion uniforme des contraintes système.
- **Coordination précise** : les ressources sont pilotées de manière cohérente, facilitant la planification et la prise de décision.
- **Optimisation économique** : les stratégies d'optimisation (coût, efficacité) peuvent être appliquées à l'ensemble du réseau.

Néanmoins, elle comporte également des limites structurelles :

- **Vulnérabilité au point unique de défaillance** : en cas de panne de l'unité centrale, l'ensemble du MR peut être impacté.
- **Bande passante et latences** : un système de communication performant est requis pour transmettre rapidement et faiblement les données.
- **Complexité croissante** : plus le MR est grand et hétérogène, plus la coordination centralisée devient difficile et coûteuse.

Cette approche est donc particulièrement adaptée aux MRs de taille modérée, où une entité centrale peut aisément superviser l'ensemble du réseau. Pour des systèmes plus vastes ou très fragmentés, d'autres solutions peuvent se révéler plus pertinentes.

1.5.2 Approche décentralisée

Dans une architecture décentralisée, la responsabilité du contrôle est répartie entre plusieurs unités autonomes, chacune agissant localement sur une portion spécifique du MR. L'idée directrice est de permettre à chaque composant (source, stockage, charge) ou sous-système de prendre des décisions indépendamment, en se basant sur ses propres mesures et objectifs.

Le contrôle local repose sur des algorithmes de contrôle et des mécanismes de coordination distribués. Chaque unité de contrôle :

- **Fonctionne en autonomie** : elle mesure localement les grandeurs électriques (tension, courant, puissance) et ajuste son contrôle en conséquence.
- **Coordonne son action** : elle utilise des protocoles de communication peer-to-peer (ou des algorithmes de consensus) pour échanger des informations clés avec les autres unités.

Ainsi, un consensus peut émerger de la coopération entre les divers contrôleurs, permettant au MR de conserver une cohérence globale sans passer par un unique point de décision.

L'approche décentralisée présente plusieurs atouts majeurs :

- **Résilience accrue** : la défaillance d'une unité n'entraîne pas nécessairement l'arrêt global du système.
- **Réactivité locale** : les décisions prises au plus près des équipements permettent une réponse rapide aux perturbations (variations de charge, production intermittente, etc.).
- **Réduction des besoins en communication** : les échanges se font principalement entre entités voisines, plutôt qu'avec un centre de contrôle unique.
- **Scalabilité** : il est plus facile d'étendre un MR décentralisé en ajoutant de nouvelles unités sans surcharger le contrôleur central.

En revanche, la décentralisation implique des enjeux spécifiques :

- **Coordination complexe** : chaque contrôleur visant ses objectifs locaux, l'optimisation globale peut devenir plus difficile à atteindre.
- **Gestion des conflits** : en l'absence d'une autorité unique, des stratégies contradictoires peuvent se mettre en place et perturber l'équilibre.
- **Synchronisation** : une bonne synchronisation des actions locales est essentielle pour éviter les oscillations ou les surtensions dues à des décisions incohérentes.

L'architecture décentralisée s'avère particulièrement intéressante lorsque la fiabilité et la résilience sont des priorités, ou lorsque le MR est de taille importante et comporte de nombreuses ressources hétérogènes.

1.5.3 Systèmes hybrides

Les architectures hybrides combinent les principes de contrôle centralisé et décentralisé afin de profiter des avantages de chacun tout en limitant les inconvénients. Elles introduisent généralement plusieurs niveaux hiérarchiques de décision : un niveau supérieur (ou central) pour coordonner et optimiser les ressources à grande échelle, et un ou plusieurs niveaux locaux pour un contrôle plus réactif et plus autonome.

Dans une organisation hiérarchisée, chaque niveau intervient à une échelle temporelle et fonctionnelle différente :

- **Niveau local** : contrôle rapide de tension et de fréquence, ajustement instantané des flux de puissance, gestion de la qualité de l'onde.
- **Niveau intermédiaire** : coordination régionale ou sous-réseau, pouvant gérer des problèmes spécifiques (variateur de tension, stockage de courte durée, etc.).
- **Niveau supérieur** : pilotage global, intégration des prévisions de charge et de production, optimisation économique ou énergétique, arbitrage entre sources et stockage sur le long terme.

La coordination entre ces différents niveaux de contrôle repose sur divers mécanismes visant à assurer l'harmonisation des décisions :

- **Protocoles de communication hiérarchiques** : chaque niveau relaie les informations pertinentes au niveau immédiatement supérieur ou inférieur.
- **Algorithmes de consensus distribués** : lorsqu'une décision doit être validée à l'échelle de plusieurs sous-réseaux, un consensus peut s'établir via des échanges inter-niveaux.
- **Mécanismes de résolution de conflits** : en cas de contradiction entre objectifs locaux et consignes globales, un protocole de négociation ou de priorisation détermine l'action à mener.
- **Supervision adaptative** : la stratégie de contrôle peut évoluer en fonction des conditions d'exploitation réelles (pics de charge, taux de pénétration de SEnR, incidents, etc.) Zhou *et al.* (2020, 2021).

Les architectures hybrides se révèlent souvent plus adaptées pour les grands systèmes ou ceux comportant des sous-réseaux aux caractéristiques très différentes, car elles offrent un compromis entre la réactivité locale et la planification globale.

1.5.4 Critères de choix et évolution

Le choix entre ces différentes architectures de contrôle (centralisée, décentralisée ou hybride) dépend en grande partie de la nature du MR, de sa taille et de ses objectifs de performance. Parmi les critères clés, les suivants peuvent être cités :

- **Complexité et échelle du système** : plus un MR est étendu et diversifié, plus il peut tirer profit d'une approche décentralisée ou hybride.
- **Exigences de performance** : si la rapidité de réaction est primordiale (p. ex. pour des charges critiques), un contrôle local fort peut s'avérer indispensable.
- **Contraintes de communication** : certaines zones isolées ou peu connectées peuvent restreindre la faisabilité d'un contrôle centralisé.
- **Objectifs économiques** : le coût d'implémentation et de maintenance d'un système centralisé peut être élevé pour un MR de grande taille.

Par ailleurs, l'émergence de nouvelles technologies de contrôle, notamment l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, offre des perspectives inédites. Des algorithmes de prédiction et de décision avancés pourraient améliorer la capacité des MRs à s'adapter en temps réel, rendant les architectures hybrides encore plus performantes et évolutives.

La compréhension fine des différentes options d'architecture de contrôle (centralisée, décentralisée ou hybride) constitue un prérequis essentiel pour la conception et la gestion efficaces d'un MR. Les sections suivantes détailleront les stratégies de contrôle et les approches avancées — incluant l'IA et l'apprentissage automatique — qui peuvent renforcer la robustesse et la rentabilité du système tout au long de son cycle d'exploitation.

1.6 Structure de contrôle hiérarchique

La mise en place d'un contrôle hiérarchique constitue l'une des approches les plus étudiées pour piloter efficacement les MRs. Plusieurs travaux pionniers Guerrero, Vasquez, Matas, de Vicuna & Castilla (2011b); Nasirian, Shafiee, Guerrero, Lewis & Davoudi (2016); Vandoorn, De Kooning, Meersman, Guerrero & Vandeveld (2012) ont proposé une organisation en

plusieurs niveaux, chacun ciblant des objectifs spécifiques à des échelles de temps différentes. Cette section détaille les quatre principaux niveaux de contrôle, tout en mettant en évidence les contributions clés de la littérature à ce sujet.

1.6.1 Contrôle interne (niveau 0)

Le *contrôle interne*, parfois appelé « contrôle de base », représente le niveau le plus fondamental de la hiérarchie Guerrero *et al.* (2011b). Il agit directement au niveau des convertisseurs de puissance et vise à assurer une stabilité primaire face aux variations rapides de courant et de tension. Selon Nasirian *et al.* (2016), des temps de réponse de l'ordre de la microseconde à la milliseconde sont indispensables pour garantir la protection des composants et la continuité de service du MR Cao *et al.* (2020); Lu *et al.* (2022).

1.6.1.1 Contrôle des convertisseurs

Le contrôle des convertisseurs de puissance s'appuie généralement sur des boucles de contrôle imbriquées Guerrero *et al.* (2011b) :

- **Boucle de courant interne** : assurant la limitation des surintensités et le suivi précis des références de courant, avec un temps de réponse inférieur à 1 *ms* et une précision de suivi meilleur que 1 %.
- **Boucle de tension externe** : maintenant la stabilité de la tension de sortie et compensant les variations de charge, avec une précision de ± 2 % et une réponse dynamique rapide.

Ces boucles sont essentielles pour rejeter efficacement les perturbations de courte durée et limiter les interactions néfastes entre convertisseurs.

1.6.1.2 Techniques de modulation

Les techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) jouent un rôle critique dans la performance du système Vandoorn *et al.* (2012). Différentes stratégies (MLI sinusoïdale, espace vectoriel, etc.) sont évaluées en fonction de critères tels que :

- **Performance spectrale** : minimisation de la distorsion harmonique totale souvent visée à $< 3\%$ en régime nominal.
- **Réduction du bruit et des pertes** : limitation du bruit acoustique et équilibrage des pertes de commutation pour accroître la fiabilité.
- **Optimisation du spectre harmonique** : répartition adéquate des composantes harmoniques pour respecter les normes de qualité d'onde.

Le choix de la technique de modulation influe directement sur la qualité de l'énergie délivrée et la longévité des composants de puissance.

1.6.2 Contrôle primaire

Le *contrôle primaire* est généralement autonome et indépendant des communications avec d'autres niveaux. Comme le soulignent Guerrero *et al.* (2011b); Nasirian *et al.* (2016), il opère sur des échelles de temps de la milliseconde à la seconde et assure la stabilisation initiale de la tension et de la fréquence au sein du MR.

1.6.2.1 Contrôle de la tension et de la fréquence

Les mécanismes de contrôle primaire, souvent basés sur le concept de statisme (« droop control »), permettent une répartition naturelle de la puissance Nasirian *et al.* (2016); Pérez-Ibacache *et al.* (2022); Jabr (2022) :

- **Réponse proportionnelle aux variations de charge** : chaque source adapte sa production afin de contribuer à l'équilibre.
- **Équilibrage automatique des puissances** : évite les surcharges et les sous-tensions localisées.
- **Maintien des limites opérationnelles** : garantis la stabilité du MR en prévenant les dérives de tension et de fréquence.

En pratique, ce niveau de contrôle est crucial pour réagir rapidement aux fluctuations de la demande et aux variations de production (en particulier pour les SEnR intermittentes).

1.6.3 Contrôle secondaire

À l'échelle de quelques secondes, le *contrôle secondaire* vise à corriger les déviations de tension et de fréquence que le contrôle primaire n'a pu éliminer. Cette philosophie de conception a été popularisée par Guerrero *et al.* (2011b) et consiste à ajuster progressivement les points de fonctionnement afin de ramener le MR à ses valeurs nominales Nandakumar, Li, Xu & Huang (2025); Guo *et al.* (2021).

1.6.3.1 Restauration des valeurs nominales

Le contrôle secondaire met en œuvre des algorithmes qui :

- **Corrigent les écarts de fréquence** : réalignent la fréquence sur 50 *Hz* ou 60 *Hz*, selon la région.
- **Optimisent les profils de tension** : réduisent les déséquilibres et ajustent localement la tension pour améliorer la qualité d'alimentation.
- **Coordonnent les actions de contrôle** : assurent une cohérence globale du MR, surtout en présence de multiples sources.
- **Gèrent les contraintes opérationnelles** : prennent en compte les limites thermiques et de capacité des ressources.

Ainsi, le contrôle secondaire complète efficacement le contrôle primaire en garantissant le retour à l'équilibre électrique du MR sur le moyen terme.

1.6.4 Contrôle tertiaire

Le *contrôle tertiaire* opère sur des horizons de temps allant de quelques minutes à plusieurs heures, voire plus. Il a pour ambition l'optimisation économique et la planification stratégique du MR Vandoorn *et al.* (2012); Watson *et al.* (2021); Rashidirad, Mahseredjian, Kocar, Karaagac & Saad (2023).

1.6.4.1 Optimisation économique

Dans un contexte de plus en plus tourné vers la flexibilité et la rentabilité, le contrôle tertiaire prend en compte :

- **Coûts de production et prix du réseau** : sélection des sources les plus avantageuses (renouvelables, conventionnelles) et arbitrage entre achats/vente sur le réseau principal.
- **Disponibilité des ressources** : prise en compte des calendriers de maintenance, de la durée de vie des batteries, etc.
- **Prévisions de charge et de production** : gestion proactive du stockage et planification des stratégies de participation aux marchés de l'énergie.

Ce niveau assure ainsi la pérennité économique du MR tout en respectant les contraintes techniques émanant des niveaux inférieurs.

1.6.5 Coordination entre niveaux

Pour être pleinement fonctionnel, le contrôle hiérarchique doit intégrer une *coordination efficace* entre les différents niveaux. Dans la littérature, plusieurs auteurs Guerrero *et al.* (2011b); Vandoorn *et al.* (2012) insistent sur la nécessité d'une séparation claire des objectifs et des échelles de temps afin d'éviter les conflits de décision Deng *et al.* (2021); Zhou *et al.* (2021).

1.6.5.1 Séparation des échelles de temps

Chaque niveau s'occupe d'une dynamique temporelle spécifique :

- **Contrôle interne (Niveau 0)** : microsecondes à millisecondes.
- **Contrôle primaire** : millisecondes à secondes.
- **Contrôle secondaire** : secondes à minutes.
- **Contrôle tertiaire** : minutes à heures.

Cette structure multi-niveaux permet d'optimiser le MR aussi bien du point de vue de la fiabilité à court terme que de la rentabilité à long terme.

Au final, la contrôle hiérarchique combinant contrôle interne, primaire, secondaire et tertiaire constitue un socle robuste pour la gestion coordonn e d'un MR. La section suivante examinera les stratégies spécifiques de contrôle des convertisseurs, lesquelles constituent la base de ce cadre hiérarchique et jouent un rôle déterminant dans la stabilité du système.

1.7 Stratégies de contrôle des convertisseurs

La commande des convertisseurs de puissance joue un rôle décisif dans la stabilité et la performance globale d'un MR. En effet, selon les modes opératoires et les objectifs du MR (injection de puissance, contrôle tension/fréquence, etc.), les convertisseurs peuvent adopter différents comportements. Dans cette section, trois grandes catégories de convertisseurs (formateurs, alimentant, et de support) ainsi que les techniques de synchronisation essentielles à leur fonctionnement coordonné sont pass es en revue Niu, Zhang, Qu, Wang & Li (2024); Arunima & Subudhi (2024); Huang *et al.* (2025); Vaishnav, Jain & Sharma (2025).

1.7.1 Convertisseurs formateurs de réseau

Les convertisseurs *Grid-Forming* (formateurs de réseau) sont particulièrement critiques dans la constitution du MR, notamment en mode isolé. Leur fonction principale consiste à établir et maintenir la référence de tension et de fréquence, permettant ainsi aux autres convertisseurs de se synchroniser sur un signal commun.

Un convertisseur formateur de réseau agit comme une source de tension contr l e. Il s'appuie sur une structure de contrôle en cascade, souvent compos e d'une boucle externe de tension et d'une boucle interne de courant. La boucle externe veille au maintien d'une tension stable (avec une précision de l'ordre de $\pm 2\%$), tandis que la boucle interne gère la protection et le suivi précis des courants en temps réel.

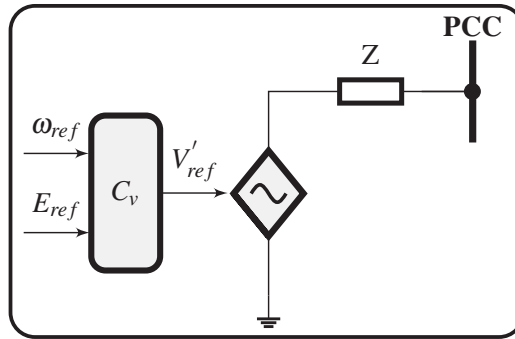


Figure 1.3 Convertisseur de puissance formant un réseau

Pour remplir ce rôle critique, le convertisseur formateur doit répondre à plusieurs critères de performance :

- **Stabilité en tension** : l'écart statique doit demeurer inférieur à 2 % de la consigne pour éviter tout déséquilibre important.
- **Réponse dynamique rapide** : le temps d'établissement devrait rester sous la barre des 20 ms afin de faire face aux variations soudaines de charge.
- **Robustesse** : le contrôle doit tolérer des fluctuations importantes (de charge ou d'ensoleillement par exemple) sans compromettre la stabilité du MR.
- **Synchronisation multi-convertisseur** : le convertisseur formateur doit gérer efficacement la cohabitation avec d'autres sources, en particulier lorsque plusieurs convertisseurs formateurs opèrent simultanément.

L'implémentation pratique du contrôle s'effectue souvent dans le référentiel synchronisé dq Ashtiani, Khajehoddin & Karimi-Ghartemani (2022); Rashidirad *et al.* (2023), permettant un découplage plus net entre composantes active et réactive. Parmi les approches couramment utilisées, les suivantes sont employées :

- **Découplage des composantes P/Q** : la séparation en composantes d et q facilite la gestion des flux de puissance.
- **Compensation des termes de couplage** : réduction des interactions parasites entre la tension et le courant.

- **Limitations de courant** : maintien du fonctionnement dans un cadre sûr, à l'aide de contraintes de courant maximales.
- **Implémentation de l'inertie virtuelle** : amélioration de la stabilité en imitant le comportement inertiel d'une machine synchrone classique Ashtiani *et al.* (2022); Rashidirad *et al.* (2023).

Ainsi, grâce à des algorithmes de contrôle avancés, les convertisseurs formateurs de réseau offrent un point de référence robuste autour duquel le MR peut s'organiser, y compris lors de variations rapides de charge ou de production.

1.7.2 Convertisseurs alimentant le réseau

Les convertisseurs *Grid-Feeding* (*alimentant le réseau*) injectent de la puissance dans un réseau dont la tension et la fréquence sont déjà imposées. Dans ce contexte, ils se comportent davantage comme des sources de courant contrôlées, modulant leur injection de puissance active et réactive en fonction des consignes reçues.

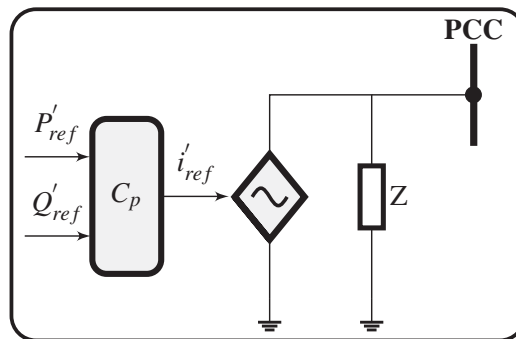


Figure 1.4 Convertisseur de puissance alimentant le réseau

Le contrôle en puissance de ce type de convertisseurs s'effectue généralement via une architecture à deux niveaux :

1. **Niveau externe (contrôle de puissance)** : à partir des consignes de puissance active (P) et réactive (Q), ce niveau calcule les références de courant à injecter. Il doit tenir compte

des variations de tension, du facteur de puissance souhaité et des limites opérationnelles (puissance maximale, tension admissible).

2. **Niveau interne (contrôle de courant) :** une fois les références de courant établies, la boucle interne assure le suivi rapide de ces consignes tout en protégeant le convertisseur contre les surcharges et en limitant la distorsion harmonique Gupta *et al.* (2021); Deng *et al.* (2021).

Dans le cadre de ces convertisseurs, plusieurs priorités émergent :

- **Optimisation du facteur de puissance :** afin de minimiser les pertes et d'améliorer la stabilité du réseau.
- **Rejet des perturbations :** la boucle interne doit compenser rapidement les variations soudaines de tension réseau.
- **Protection du convertisseur :** en évitant les surintensités susceptibles d'endommager l'électronique de puissance.

Cette stratégie hiérarchique permet une gestion fine de l'injection de puissance et facilite l'intégration de SEnR intermittentes.

1.7.3 Convertisseurs de support réseau

Situés à mi-chemin entre les convertisseurs formateurs et alimentant, les convertisseurs *Grid-Supporting* (de support réseau) contribuent simultanément à la contrôle de tension/fréquence et à l'injection de puissance. Leur flexibilité d'exploitation est particulièrement appréciée dans les MRs complexes ou de grandes tailles.

1.7.3.1 Mode source de tension

En mode source de tension, ces convertisseurs se comportent comme des générateurs virtuels, participant activement au contrôle de la tension et de la fréquence. Le recours à une impédance de sortie virtuelle permet un partage de puissance *via* des mécanismes de *droop control* (statisme) Wang *et al.* (2021); Eajal *et al.* (2021) :

- **Participation au contrôle V/f** : fourniture ou absorption de puissance réactive pour stabiliser la tension, et ajustement de la puissance active pour soutenir la fréquence.
- **Partage naturel de la charge** : en l'absence de communication, les convertisseurs se répartissent spontanément la fourniture d'énergie en fonction de leurs paramètres de statisme.
- **Coordination multisource** : capacité à fonctionner en parallèle avec d'autres convertisseurs formateurs ou de support.

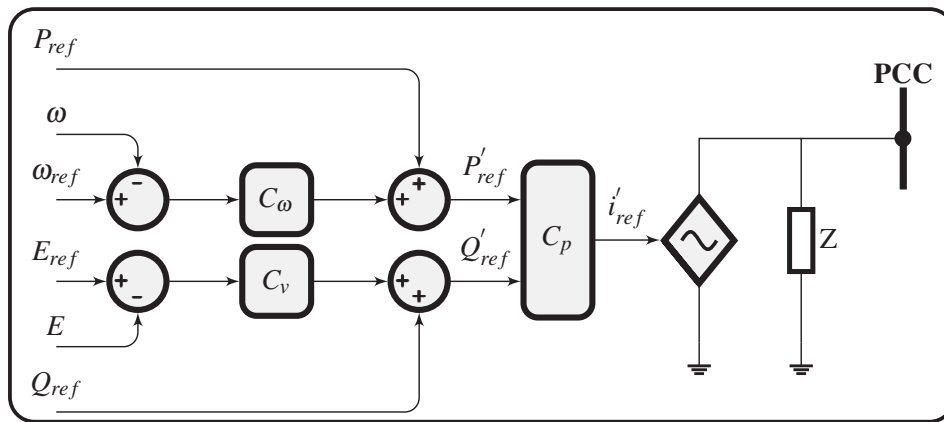


Figure 1.5 Convertisseur de puissance soutenant un réseau en courant

1.7.3.2 Mode source de courant

Dans ce mode, le convertisseur se comporte plutôt comme un injecteur de courant contrôlé, tout en participant au maintien de la stabilité du réseau. Les avantages majeurs incluent :

- **Protection contre les surcharges** : les intensités peuvent être limitées plus facilement, évitant ainsi d'éventuelles saturations.
- **Contrôle précis de la puissance injectée** : simplification des calculs de flux P/Q, ce qui est utile pour intégrer les SEnR fluctuant fortement.
- **Flexibilité de gestion** : possibilité de changer de mode (par exemple, basculer en mode source de tension si nécessaire) pour s'adapter à l'état du MR.

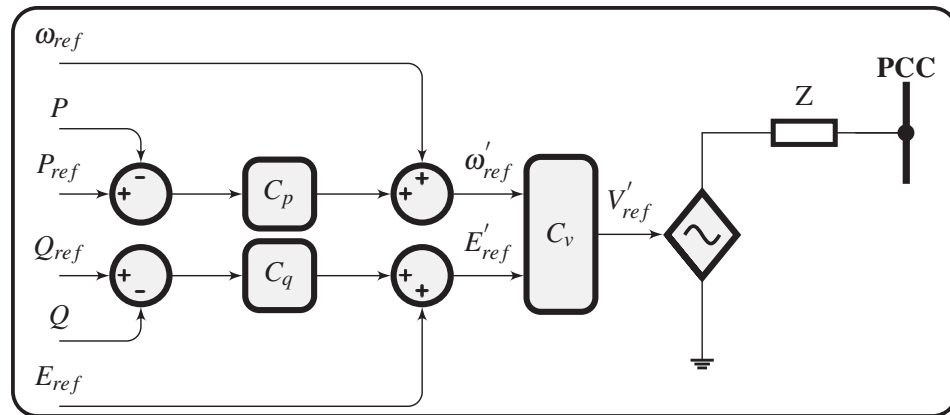


Figure 1.6 Convertisseur de puissance soutenant un réseau en tension

1.7.4 Techniques de synchronisation

Quel que soit le type de convertisseur, la synchronisation avec le réseau (ou avec les autres convertisseurs) constitue un enjeu majeur. Les boucles à verrouillage de phase (*Phase-Locked Loop*, PLL) sont couramment utilisées, mais peuvent être adaptées pour traiter des conditions de réseau variées (perturbations, harmoniques, etc.).

1.7.4.1 Méthodes de synchronisation modernes

Les PLL avancées incluent souvent des mécanismes de filtrage actif, des algorithmes adaptatifs et des modules de détection d'harmoniques. Leur performance se juge sur :

- **Robustesse aux harmoniques** : capacité à continuer de suivre la phase et la fréquence malgré la présence de distorsions élevées.
- **Vitesse de convergence** : temps nécessaire pour resynchroniser le convertisseur après un incident ou lors d'un changement de mode.
- **Détection de défauts** : aptitude à identifier rapidement une situation de défaut (par exemple, un court-circuit) afin de protéger le convertisseur et le MR Shahab *et al.* (2020); Abdolmaleki, Shafiee, Seifi, Arefi & Blaabjerg (2020).

1.7.4.2 Gestion des transitions

Lorsqu'un MR passe d'un mode connecté à un mode isolé (ou inversement), les convertisseurs doivent adapter leurs paramètres de contrôle de manière cohérente pour éviter des transitoires brutaux. Les actions typiques consistent à :

- **Synchroniser progressivement les tensions** : ajustement fin de l'amplitude et de la phase avant la fermeture ou l'ouverture d'un disjoncteur.
- **Adapter dynamiquement les références de courant** : réévaluation des consignes P/Q selon le nouveau contexte opérationnel.
- **Gérer les transitoires de commutation** : limitation des courants de circulation et des surtensions momentanées.

Au terme de cette analyse, il apparaît que la stratégie de contrôle des convertisseurs ne peut être envisagée de manière isolée. Elle doit s'intégrer dans la hiérarchie globale du MR (contrôles interne, primaire, secondaire et tertiaire), tout en tenant compte des exigences de stabilité, de qualité de l'onde et d'optimisation économiques. Dans la section suivante, les technologies avancées et les tendances émergentes (intelligence artificielle, techniques de prédiction, etc.) permettant d'améliorer davantage les performances de ces stratégies de contrôle seront abordées.

1.8 Technologies avancées et tendances

L'évolution rapide des technologies numériques et des méthodes de contrôle ouvre de nouvelles perspectives d'optimisation pour les MRs. Les avancées en intelligence artificielle, en contrôle prédictif et en cybersécurité, notamment, offrent des leviers puissants pour améliorer la performance, la fiabilité et la flexibilité de ces systèmes distribués. Dans cette section, les principaux domaines d'innovation et leur impact potentiel sur l'avenir des MRs sont passés en revue.

1.8.1 Intelligence artificielle et apprentissage

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le contrôle des MRs représente une avancée majeure. Les méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond permettent de mieux s'adapter aux évolutions rapides du système et d'optimiser en continu les stratégies de contrôle. Par ailleurs, plusieurs travaux récents Wang & Wai (2022); Zhang & Wai (2022) illustrent l'efficacité de ces approches pour la prévision de la production renouvelable et l'optimisation des flux de puissance.

1.8.1.1 Réseaux de neurones pour le contrôle

Les RNA se distinguent par leur capacité à modéliser des phénomènes complexes et à extraire des tendances à partir de grandes quantités de données. Dans le contexte des MRs, ces capacités permettent :

1.8.1.1.1 Applications dans le contrôle

- **Prédiction de la production renouvelable** : en analysant les données météorologiques et historiques, un RNA peut anticiper les variations d'ensoleillement ou de vent Wang & Wai (2022).
- **Optimisation dynamique des flux de puissance** : l'ajustement en temps réel des consignes P/Q pour chaque unité (source ou stockage) permet de maintenir la stabilité du MR et d'améliorer l'efficacité énergétique.
- **Détection et classification des perturbations** : identification rapide des anomalies (courts-circuits, surcharges, etc.) et déclenchement des mesures correctrices.
- **Adaptation des paramètres de contrôle** : ajustement automatique des gains de contrôle (p. ex., boucle de tension, de courant) en fonction des conditions d'exploitation.

1.8.1.1.2 Architectures neuronales spécialisées

- **Réseaux récurrents** : utiles pour la prédiction de séries temporelles, comme la charge électrique ou la production solaire.
- **Réseaux profonds** : capables de traiter des problèmes d'optimisation multi-objectif (coût, fiabilité, impact environnemental).
- **Architectures hybrides** : combinant plusieurs types de réseaux (récurrents, convolutionnels) pour un contrôle adaptatif global.
- **Réseaux convolutifs** : appliqués à l'analyse de signaux et à la détection d'harmoniques, voire à la classification d'événements transitoires Zhang & Wai (2022); Sharma, Mishra & Pullaguram (2020); Zhou *et al.* (2021).

1.8.1.2 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement consiste à apprendre, par essais et erreurs, la politique de contrôle qui maximise une fonction de récompense. Dans les MRs, il peut aider à :

- **Gestion optimale du stockage** : choix dynamique du niveau de charge ou décharge pour maximiser la durée de vie des batteries et la rentabilité du système.
- **Contrôle adaptatif des convertisseurs** : ajustement en continu des paramètres de contrôle pour maintenir la stabilité.
- **Optimisation des transitions de mode** : basculement en douceur entre mode connecté et isolé, en minimisant les transitoires de tension/fréquence.
- **Coordination multi-agents** : dans des MRs de grande taille, plusieurs convertisseurs peuvent collaborer pour optimiser conjointement la performance globale Lin, Chu & Tung (2023).

1.8.2 Contrôle prédictif

Le contrôle prédictif basé sur des modèles (Model Predictive Control, MPC) s'appuie sur une modélisation explicite du système pour anticiper son comportement à court ou moyen terme, puis optimiser les actions de contrôle en conséquence.

1.8.2.1 Modélisation et prédiction

L'efficacité du MPC dépend de la justesse et de la robustesse des modèles sous-jacents. Diverses techniques sont développées pour affiner cette modélisation :

- **Modèles hybrides physiques-statistiques** : combinaison des lois physiques (p. ex. équations de flux) et d'approches statistiques (apprentissage sur données historiques).
- **Identification en temps réel** : ajustement continu des paramètres du modèle en fonction des mesures actuelles (voltages, courants, etc.).
- **Modélisation stochastique des incertitudes** : prise en compte des variations météorologiques ou de charge pour mieux gérer les risques de déviation.
- **Réduction de modèles** : simplification de systèmes complexes (réseaux multiphasiques, grandes échelles) pour permettre l'optimisation en temps réel Hu *et al.* (2024); Zhang *et al.* (2024a).

1.8.2.2 Optimisation en temps réel

Une fois la modélisation établie, le MPC doit résoudre des problèmes d'optimisation à chaque pas de temps, souvent en quelques millisecondes ou secondes :

- **Algorithmes rapides** : méthodes numériquement efficaces (par ex. *Interior Point Methods*, optimisation en ligne) pour gérer la contrainte temps réel.
- **Décomposition des problèmes complexes** : partitionnement du MR en sous-problèmes (sous-réseaux, convertisseurs, stockage) pour réduire la complexité.
- **Parallélisation des calculs** : exploitation du calcul distribué sur plusieurs unités de contrôle pour accélérer l'itération.
- **Gestion des contraintes dynamiques** : prise en compte de limites de courant ou de tension susceptibles d'évoluer au fil du temps.

1.8.3 Cybersécurité

Avec l'essor des systèmes de contrôle numériques et des communications à distance, la cybersécurité est devenue un enjeu majeur pour la fiabilité et la sûreté des MRs. Toute faille peut compromettre l'équilibre d'un MR et impacter l'alimentation électrique d'une zone critique (hôpital, site industriel, etc.).

1.8.3.1 Protection des communications

La sécurisation des flux de données entre les différents composants (convertisseurs, contrôle centralisé, capteurs) exige une approche multicouche :

- **Cryptographie temps réel** : algorithmes légers capables de chiffrer et d'authentifier les données sans trop alourdir la latence.
- **Authentification robuste** : gestion des identités et des clés pour vérifier l'intégrité de chaque nœud du réseau.
- **Surveillance continue** : détection d'intrusions ou d'activités anormales (p. ex. dénis de service, falsification de données).
- **Plan de secours et redondance** : procédures de repli (fallback) en cas d'attaque, visant à maintenir la stabilité du MR Roos *et al.* (2021); Jabr (2022).

1.9 Conclusion

L'analyse approfondie de l'état de l'art des MRs a permis de dégager plusieurs constats critiques, qui orientent directement les développements proposés dans cette thèse. Les points clés peuvent se regrouper en trois grands volets : les limitations des approches conventionnelles, les opportunités d'innovation offertes par les technologies émergentes et les défis persistants à relever pour la mise en œuvre à grande échelle des MRs.

Malgré les progrès réalisés ces dernières années, les stratégies de contrôle classiques des MRs peinent à gérer efficacement les caractéristiques propres aux énergies renouvelables et aux modes de fonctionnement variés. Les principales difficultés recensées incluent :

- **Adaptation insuffisante face aux variations rapides des SEnR** : l'intermittence solaire ou éolienne peut générer des transitoires brusques difficiles à compenser ;
- **Complexité de coordination de multiples convertisseurs** : la coexistence de différentes unités de production et de stockage requiert une orchestration soignée et souvent centralisée ;
- **Sensibilité aux perturbations en mode isolé** : la stabilité tension/fréquence repose en grande partie sur le pilotage autonome, exposant le système aux écarts rapides de charge ;
- **Dépendance aux communications pour l'optimisation globale** : un réseau de communication peu fiable peut fragiliser la robustesse de l'ensemble du MR.

Parallèlement, les évolutions technologiques ouvrent de nouvelles perspectives pour concevoir des architectures de contrôle plus robustes et plus flexibles. Parmi les pistes les plus prometteuses, les suivantes sont distinguées :

- **Recours à l'intelligence artificielle** : les algorithmes d'apprentissage (réseaux de neurones, apprentissage par renforcement) offrent une capacité d'adaptation dynamique et d'optimisation continue ;
- **Stratégies de contrôle adaptatives** : l'ajustement en temps réel des paramètres de contrôle favorise une meilleure gestion des aléas ;
- **Émergence d'architectures décentralisées** : la répartition des fonctions de contrôle au plus près des sources et des charges améliore la résilience locale ;
- **Techniques d'optimisation en temps réel** : le développement d'algorithmes rapides et parallélisables permet de résoudre les problèmes complexes de gestion énergétique à l'échelle du MR.

Enfin, pour faire des MRs une brique essentielle de la transition énergétique, un certain nombre de verrous techniques et méthodologiques restent à lever :

- **Amélioration de la stabilité en présence forte de SEnR** : trouver l'équilibre entre production intermittente et contraintes système, y compris dans des scénarios extrêmes ;
- **Optimisation du compromis performance-complexité** : développer des solutions de contrôle suffisamment fiables sans alourdir outre mesure la mise en œuvre ;

- **Renforcement de la résilience** : garantir la continuité de service malgré des perturbations externes (pannes, surtensions) ou internes (défauts d'équipements);
- **Cybersécurité des systèmes de contrôle** : protéger le MR des attaques informatiques susceptibles de mettre en péril sa stabilité.

Au vu de ces constats, la thèse propose une nouvelle approche de contrôle, combinant RNA et OEP, pour surmonter les limitations identifiées tout en capitalisant sur les opportunités offertes par les technologies avancées.

Cette orientation vise à offrir un contrôle plus performant et plus résilient des MRs, répondant à la fois aux enjeux de stabilité, de flexibilité, et d'optimisation économique. Elle illustre également la pertinence grandissante de l'intelligence artificielle dans la conception des futurs MRs intelligents.

L'analyse approfondie de l'état de l'art des MRs a mis en évidence l'importance cruciale du contrôle des convertisseurs de puissance dans la stabilité et l'efficacité des systèmes. Les défis identifiés, notamment en termes de qualité de l'énergie et de partage de puissance, nécessitent une compréhension détaillée des techniques de modulation utilisées dans ces convertisseurs.

En effet, la performance globale d'un MR dépend fortement de la capacité des convertisseurs à générer des tensions de sortie stables et de haute qualité. Cette exigence fondamentale conduit naturellement à examiner en détail les techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) dans le chapitre suivant. Ces techniques constituent le fondement du contrôle des convertisseurs CC-CA, et leur optimisation s'avère essentielle pour répondre aux défis identifiés dans ce chapitre.

Le Chapitre 2 se concentrera donc sur l'analyse des différentes approches MLI, en établissant un lien direct entre les exigences système identifiées ici et les solutions techniques permettant d'y répondre. Cette analyse approfondie des techniques de modulation formera la base nécessaire pour le développement ultérieur de notre stratégie de contrôle innovante.

CHAPITRE 2

MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION POUR LES CONVERTISSEURS CC-CA MONOPHASÉS

2.1 Introduction

Le chapitre précédent a établi le cadre théorique des MRs et identifie les défis majeurs liés à leur contrôle, particulièrement en ce qui concerne la stabilité et la qualité de l'énergie. Ces défis se manifestent directement dans le fonctionnement des convertisseurs CC-CA, éléments essentiels de l'interface entre les sources d'énergie distribuées et le réseau électrique.

Les convertisseurs CC-CA peuvent être classés en deux grandes catégories selon la nature de leur source d'entrée : les convertisseurs à source de tension (VSI) et les convertisseurs à source de courant (CSI). Les VSI, caractérisés par une source CC d'impédance négligeable, maintiennent une tension constante aux bornes d'entrée, tandis que les CSI, alimentés par une source à haute impédance, assurent un courant constant. Cette distinction fondamentale influence le choix des composants et les stratégies de contrôle adoptées.

Les composants de commutation, tels que les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) et les MOSFET de puissance, jouent un rôle déterminant dans les performances des convertisseurs CC-CA modernes. Grâce à leurs caractéristiques d'auto-commutation et à leur contrôle par grille isolée, ces dispositifs permettent une commutation précise à haute fréquence, essentielle pour la mise en œuvre des stratégies de modulation avancées.

Les convertisseurs CC-CA monophasés se déclinent principalement en deux topologies : demi-pont et pont complet Asl, Babaei, Sabahi, Hasan Babayi Nozadian & Cecati (2018); Zhu, Wang, Liang, Tan & Jiang (2016); Chen, Ye, Chen & Xu (2021). La configuration en pont complet, bien que nécessitant quatre interrupteurs contre deux pour le demi-pont, offre une meilleure utilisation de la tension du bus continu et une plus grande flexibilité dans la mise en œuvre des stratégies de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) joue un rôle fondamental dans la performance de ces convertisseurs. Elle détermine non seulement la qualité de l'onde de sortie, mais influence également la capacité du système à répondre efficacement aux variations de charge et aux perturbations du réseau. L'optimisation des techniques MLI représente donc un levier crucial pour améliorer les performances globales du MR.

Ce chapitre établit un lien direct entre les exigences système identifiées précédemment et leur mise en œuvre technique à travers les stratégies de modulation. Cette analyse servira de fondement pour les développements ultérieurs de l'approche de contrôle présentées au chapitre 4, démontrant comment les limitations des techniques MLI conventionnelles motivent le recours à des solutions plus avancées.

2.2 Contrôle de la tension dans les convertisseurs CC-CA monophasés

La structure fondamentale d'un convertisseur CC-CA est illustrée à la figure 2.1. Ce système comprend une source de tension continue alimentant le convertisseur CC-CA à travers une banque de condensateurs de filtrage. Ce dernier joue un rôle crucial dans la stabilisation de la tension du bus continu, élément essentiel pour assurer une conversion efficace de l'énergie.

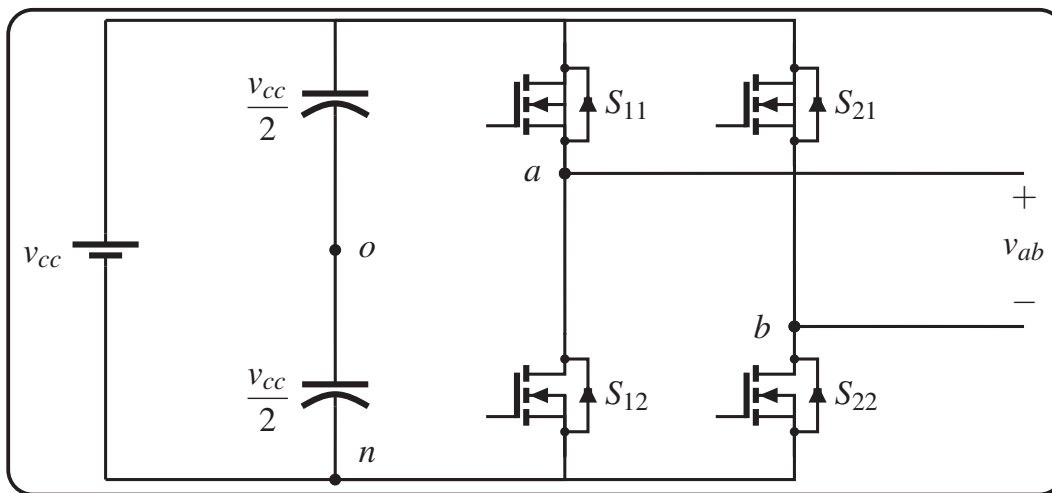


Figure 2.1 Structure générale d'un convertisseur CC-CA

Le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs CC-CA répond à plusieurs exigences fondamentales. La première concerne la stabilité de l'amplitude et de la fréquence de la tension alternative générée. Cette exigence est particulièrement critique lorsque le convertisseur alimente des charges sensibles ou doit maintenir un rapport tension/fréquence constant, notamment dans le cas d'alimentation de machines électriques. La seconde exigence porte sur la qualité de l'onde de sortie, caractérisée par son contenu harmonique et sa capacité à imposer une référence sinusoïdale.

Pour répondre à ces exigences, trois approches principales de contrôle peuvent être utilisées :

- (a) **Contrôle de la Tension de Sortie CA** : Cette approche implique l'utilisation de composants externes placés en aval du convertisseur CC-CA. Parmi ces dispositifs figurent les autotransformateurs à prises commutables, les stabilisateurs électromécaniques à gradins utilisant des contacteurs ou relais, les régulateurs électroniques à thyristors fonctionnant par angle de phase, et les transformateurs ferorésonnants à saturation magnétique contrôlée. Ces équipements permettent d'ajuster l'amplitude de la tension de sortie avec une précision variable selon la technologie employée. Bien que cette méthode offre une solution robuste, particulièrement pour les applications de forte puissance, elle présente l'inconvénient d'augmenter significativement le volume et le coût du système, tout en introduisant des pertes supplémentaires liées aux phénomènes magnétiques et résistifs des composants additionnels.
- (b) **Contrôle de la Tension d'Entrée CC** : Cette méthode repose sur un système en cascade où la tension du bus continu en amont du convertisseur CC-CA est régulée dynamiquement. Un convertisseur CC-CC intermédiaire (généralement de type Buck, Boost ou Buck-Boost) module la tension d'entrée selon une consigne précise, tandis que l'onduleur fonctionne avec un indice de modulation fixe. La tension de sortie CA devient ainsi proportionnelle à la tension du lien CC, permettant un contrôle indirect mais précis. Cette approche, bien que flexible, nécessite une électronique de puissance additionnelle, augmente la complexité de la commande, et peut réduire l'efficacité globale du système en raison des étages de conversion supplémentaires.

(c) **Contrôle Interne par MLI** : La modulation de largeur d'impulsion s'impose comme la solution privilégiée pour le contrôle de tension dans les convertisseurs CC-CA modernes. Cette technique présente plusieurs avantages déterminants :

- Contrôle direct de la tension de sortie sans composants externes additionnels,
- Réduction significative des harmoniques de bas ordre,
- Possibilité de filtrage efficace des harmoniques de haute fréquence,
- Réponse dynamique rapide aux variations de charge.

La mise en œuvre de la MLI repose sur le principe fondamental de la modulation de la durée de conduction des interrupteurs de puissance. En ajustant les rapports cycliques des signaux de commande, il devient possible de contrôler la valeur moyenne de la tension sur chaque période de commutation, permettant ainsi de synthétiser une tension alternative dont les caractéristiques se rapprochent d'une sinusoïde.

2.2.1 Contrôle par modulation de largeur d'impulsion

La MLI est une technique efficace pour réguler la tension de sortie d'un convertisseur CC-CA sans recourir à des circuits de contrôle externes. Le principe de la MLI repose sur l'ajustement des périodes de marche et d'arrêt des interrupteurs du convertisseur CC-CA afin de moduler la tension de sortie. En contrôlant précisément les temps de commutation, il est possible de réguler la tension de sortie et de minimiser les distorsions harmoniques.

Les avantages du schéma de contrôle MLI sont nombreux :

- **Contrôle précis de la tension de sortie** : La MLI permet d'obtenir une tension de sortie contrôlée en modulant la largeur des impulsions appliquées aux interrupteurs du convertisseur CC-CA.
- **Réduction des harmoniques de bas ordre** : La MLI minimise les harmoniques de bas ordre contenus dans la tension de sortie, améliorant ainsi la qualité de l'énergie fournie au réseau. Les harmoniques de rangs élevés peuvent être facilement filtrés à l'aide de filtres passifs, réduisant les interférences et améliorant la performance du système.

- **Réponse rapide aux variations de charge** : En ajustant rapidement les temps de commutation, la MLI peut répondre efficacement aux variations de charge, assurant ainsi une stabilité et un contrôle optimaux de la tension de sortie.

Le principal inconvénient du schéma MLI réside dans la complexité des éléments de filtrage nécessaires pour atténuer les harmoniques de haute fréquence générées par les commutations rapides. Ces composants de filtrage (inductances et condensateurs) représentent une part significative du coût total du système, particulièrement pour les applications de puissance élevée. En revanche, les dispositifs semi-conducteurs de commutation, bien que nécessitant des temps de mise en marche et d'arrêt très courts, ont connu une diminution constante de leur coût. Malgré ces considérations économiques, la MLI demeure largement adoptée dans les applications industrielles en raison de ses nombreux avantages techniques et de ses performances supérieures.

Les techniques MLI consistent en des impulsions d'amplitude constante avec des rapports cycliques variables d'une période de commutation à l'autre. La largeur de ces impulsions est modulée afin de contrôler la tension de sortie du convertisseur CC-CA et de réduire son contenu harmonique. Différentes techniques MLI existent, se différenciant principalement par le contenu harmonique de leurs tensions de sortie respectives. Le choix d'une technique MLI spécifique dépend des exigences en termes de contenu harmonique admissible dans la tension de sortie du convertisseur CC-CA.

2.2.2 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (MLIS) constitue une technique fondamentale pour la commande des convertisseurs CC-CA. Son principe repose sur la génération d'une série d'impulsions de largeur variable dont la valeur moyenne instantanée reproduit une onde sinusoïdale de référence. Cette approche permet d'obtenir une tension de sortie de qualité tout en maintenant un contrôle précis de son amplitude fondamentale.

2.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le processus de modulation implique deux signaux distincts :

- Une onde porteuse triangulaire à haute fréquence $v_c(t)$,
- Un signal de référence sinusoïdal $v_{\text{ref}}(t)$ à la fréquence fondamentale désirée.

La comparaison de ces deux signaux détermine les instants de commutation des interrupteurs de puissance. Cette comparaison est caractérisée par deux indices de modulation fondamentaux :

$$m_a = \frac{V_{\text{ref}}}{V_c} \quad (\text{indice de modulation d'amplitude}) \quad (2.1)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_{\text{ref}}} \quad (\text{indice de modulation de fréquence}) \quad (2.2)$$

Ces indices constituent les paramètres fondamentaux qui gouvernent les performances du convertisseur et établissent le cadre analytique pour l'ensemble des développements ultérieurs. Le paramètre m_a détermine directement l'amplitude de la tension de sortie, tandis que m_f influence la distribution harmonique et les pertes par commutation.

L'analyse approfondie de ces indices dans les sections suivantes permettra d'établir les relations précises entre les paramètres de modulation et la qualité spectrale du signal généré, démontrant ainsi les limites inhérentes aux techniques MLI conventionnelles. Cette compréhension mathématique sera ensuite exploitée au chapitre 6 pour justifier et développer des stratégies de modulation avancées répondant aux exigences spécifiques des MRs isolés.

2.2.2.2 Implémentation dans un convertisseur demi-pont

Dans la configuration demi-pont illustrée à la figure 2.2, la génération des signaux de commande est réalisée par comparaison entre la porteuse et le signal de référence.

Pour mettre en œuvre la MLIS, une onde porteuse triangulaire de haute fréquence est comparée à une référence sinusoïdale de la fréquence désirée, comme illustré à la figure 2.3.

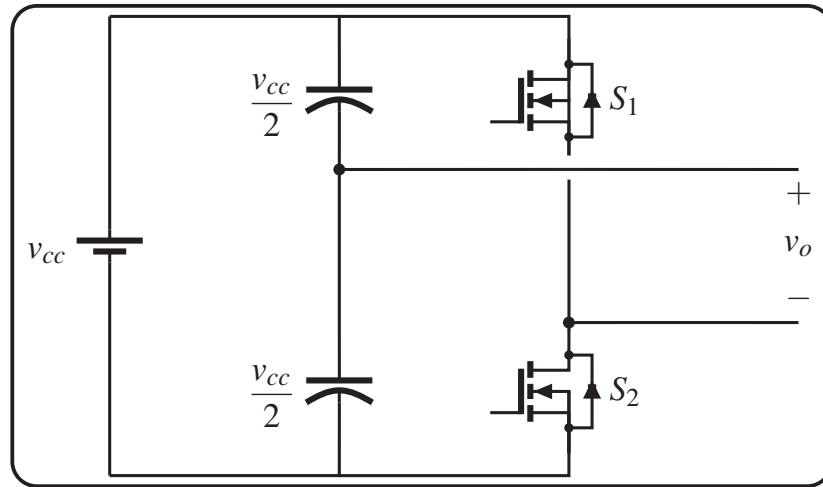


Figure 2.2 Schéma d'un convertisseur CC-CA MLI en demi-pont

Les interrupteurs S_1 et S_2 sont contrôlés selon les relations suivantes :

$$v_{\text{ref}} > v_c, \quad S_1 \text{ est activé} \Rightarrow v_o = \frac{v_{cc}}{2}, \quad (2.3)$$

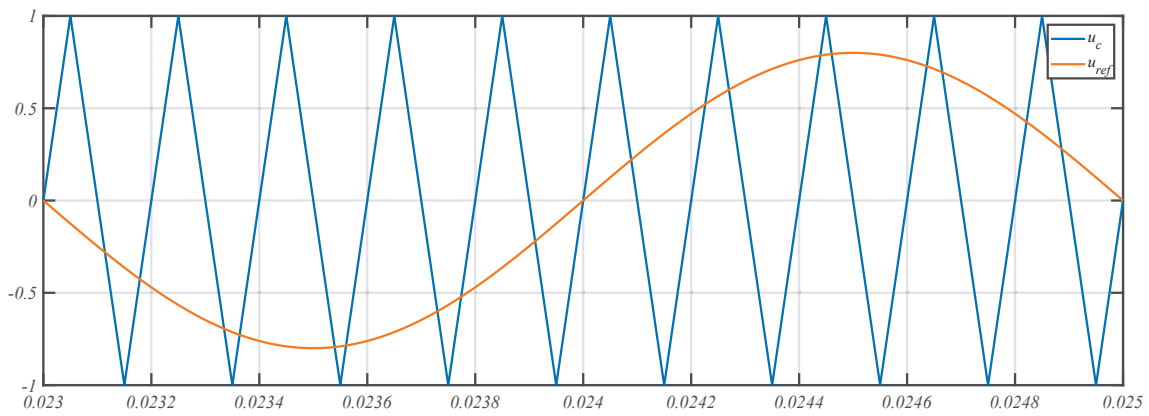
$$v_{\text{ref}} < v_c, \quad S_2 \text{ est activé} \Rightarrow v_o = -\frac{v_{cc}}{2}. \quad (2.4)$$

Pour satisfaire la loi de Kirchhoff, les interrupteurs sur la même branche ne sont pas activés simultanément. La relation suivante est donc vraie à tout instant :

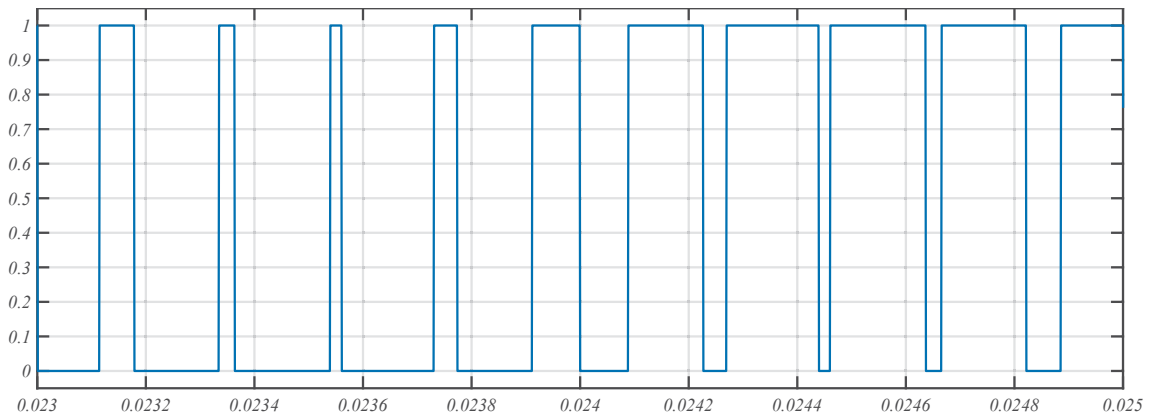
$$S_1 + S_2 = 1. \quad (2.5)$$

La tension de sortie fluctue entre $\frac{v_{cc}}{2}$ et $-\frac{v_{cc}}{2}$, comme illustré à la figure 2.3.

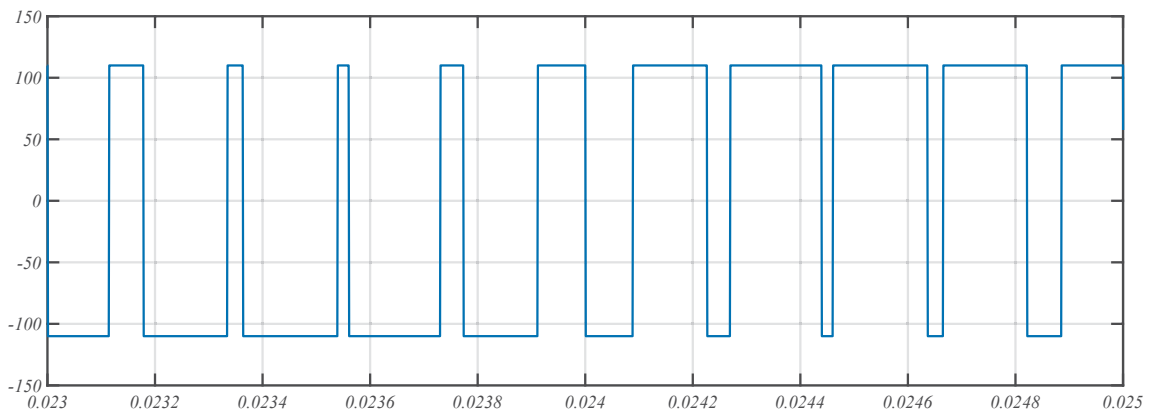
La sortie du comparateur est utilisée pour générer les impulsions de déclenchement, alignant la largeur d'impulsion de la tension de sortie avec celle du signal de comparaison. Le rapport de la magnitude de v_{ref} à v_c , appelé indice de modulation (m_i), régule le contenu harmonique de l'onde de tension de sortie. La magnitude de la composante fondamentale est proportionnelle à m_i , tandis que l'amplitude de l'onde triangulaire est généralement maintenue constante.



a) Comparaison sinusoïdale-triangle



b) Impulsions de commutation après comparaison



c) Tension de sortie du convertisseur CC-CA en demi-pont

Figure 2.3 Illustration du MLIS

Le rapport de modulation de fréquence est défini par :

$$m_f = \frac{f_t}{f_m}, \quad (2.6)$$

où f_t est la fréquence de l'onde porteuse triangulaire et f_m celle du signal de modulation.

2.3 Convertisseurs CC-CA monophasés en pont complet

Les convertisseurs CC-CA monophasés jouent un rôle crucial dans les systèmes de conversion d'énergie. Ils permettent de transformer une source de courant continu en courant alternatif, ce qui est essentiel pour alimenter des appareils domestiques et industriels, des systèmes de puissance renouvelable, des onduleurs sans interruption (UPS), et des entraînements de moteurs.

2.3.1 Schéma du convertisseur CC-CA monophasé en pont complet

Un convertisseur CC-CA monophasé utilisant la topologie en pont complet est présenté à la figure 2.4. Il est composé de quatre dispositifs de commutation, deux sur chaque branche.

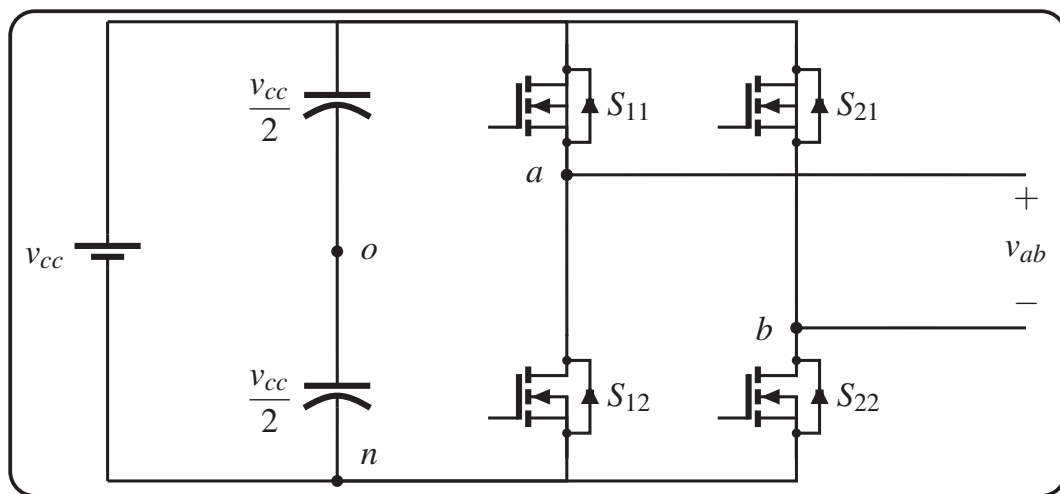


Figure 2.4 Schéma d'un convertisseur CC-CA monophasé en pont complet

Le convertisseur CC-CA en pont complet peut produire une puissance de sortie deux fois supérieure à celle du convertisseur CC-CA en demi-pont avec la même tension d'entrée *Asl et al.*

(2018); Zhu *et al.* (2016); Chen *et al.* (2021). Cette configuration permet un meilleur contrôle de la forme d'onde et une réduction des distorsions harmoniques, bénéfique pour les applications nécessitant une haute qualité de puissance.

Les tensions de sortie et les courants d'entrée dans un convertisseur CC-CA en pont complet peuvent être exprimés à l'aide des équations suivantes. Ces équations permettent de déterminer les relations entre les différentes variables de tension et de courant dans le système :

$$v_{ao} = \frac{v_{cc}}{2}(S_{11} - S_{12}) + v_{no}, \quad (2.7)$$

$$v_{bo} = \frac{v_{cc}}{2}(S_{21} - S_{22}) + v_{no}, \quad (2.8)$$

$$I_a = (S_{11} - S_{12})I_d, \quad (2.9)$$

$$v_{ab} = v_{an} - v_{bn}. \quad (2.10)$$

Les tensions v_{an} et v_{bn} représentent les tensions de sortie des phases A et B par rapport à un point arbitraire n , et v_{no} est la tension neutre entre le point n et le point milieu de la source CC.

2.3.2 MLIS avec commutation bipolaire

La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale avec commutation bipolaire (MLIS bipolaire) est une technique couramment utilisée pour sa simplicité et son efficacité à réduire les distorsions harmoniques. Dans ce schéma, les transistors diagonalement opposés S_{11} et S_{22} , ainsi que S_{21} et S_{12} , sont activés ou désactivés simultanément. Cela permet de créer une tension de sortie équilibrée, comme illustré à la figure 2.5. La tension de sortie est déterminée en comparant le signal de commande v_{ref} et le signal triangulaire v_c pour obtenir les impulsions de commutation des interrupteurs de puissance.

Le schéma de commutation est le suivant :

$$\begin{aligned}
 v_{\text{ref}} > v_c : \quad & S_{11} \text{ est activé} \Rightarrow v_{ao} = \frac{v_{cc}}{2}, \\
 & S_{22} \text{ est activé} \Rightarrow v_{bo} = -\frac{v_{cc}}{2}, \\
 v_{\text{ref}} < v_c : \quad & S_{12} \text{ est activé} \Rightarrow v_{ao} = -\frac{v_{cc}}{2}, \\
 & S_{21} \text{ est activé} \Rightarrow v_{bo} = \frac{v_{cc}}{2}, \\
 \text{Avec :} \quad & v_{ab} = v_{ao} - v_{bo}.
 \end{aligned}$$

La tension entre phases est donnée par l'équation 2.11 :

$$v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \quad (2.11)$$

La crête de la composante de fréquence fondamentale dans la tension de sortie est donnée par l'équation 2.12 :

$$v_{ab} = m_i v_{cc}, \quad m_i \leq 1.0, \quad (2.12)$$

$$v_{ab} = \frac{4v_{cc}}{\pi}, \quad m_i \geq 1.0. \quad (2.13)$$

Étant donné que la tension commute entre deux niveaux $-v_{cc}$ et v_{cc} , le schéma est appelé MLIS bipolaire. La relation entre la tension d'entrée et de sortie fondamentale dans la région de surmodulation est donnée par l'équation 2.14 :

$$v_o = M v_{cc} \quad (2.14)$$

avec :

$$M = \frac{2 \sin(\alpha)}{\pi(1 - \cos(\alpha))}, \quad m_i > 1. \quad (2.15)$$

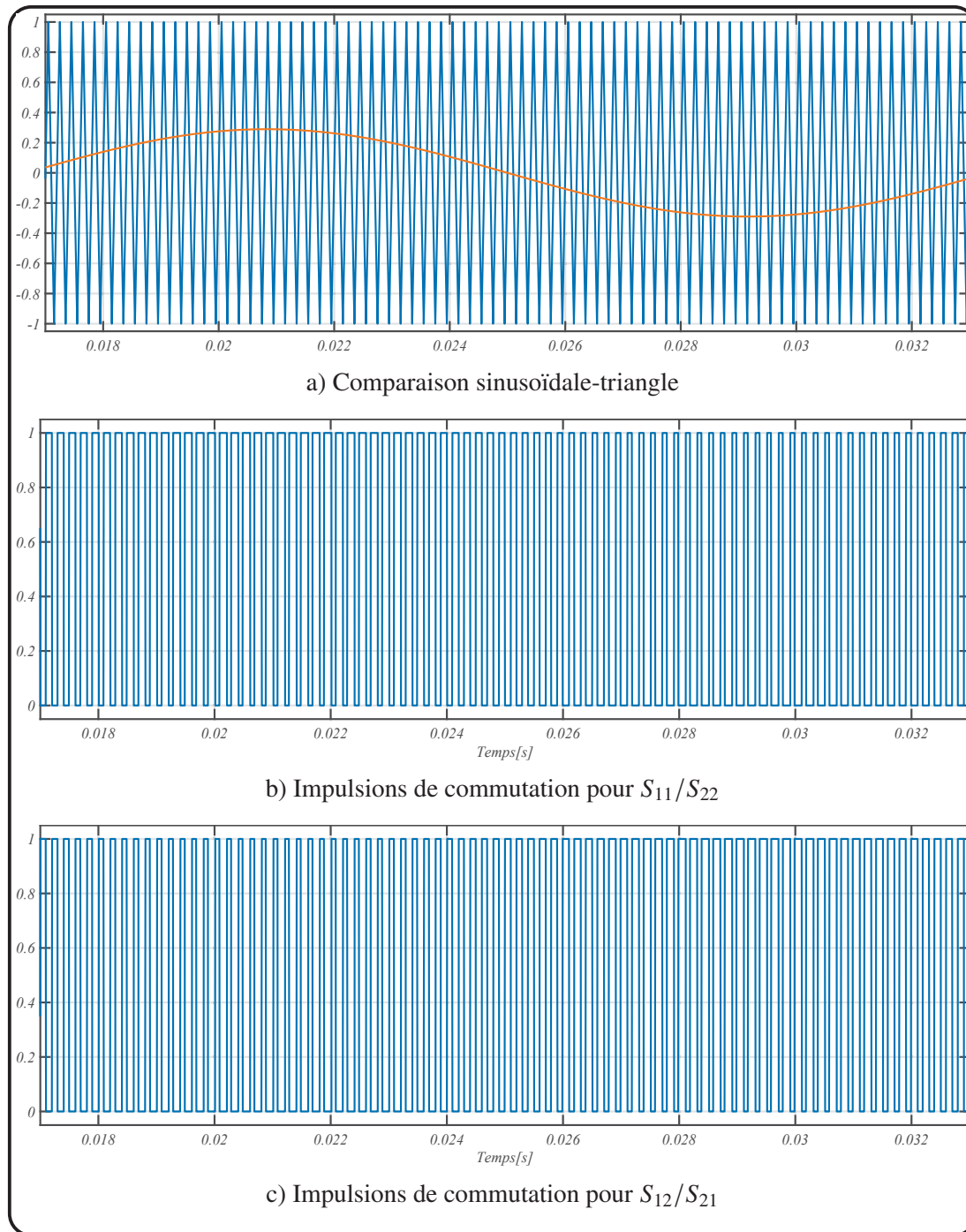


Figure 2.5 MLI bipolaire

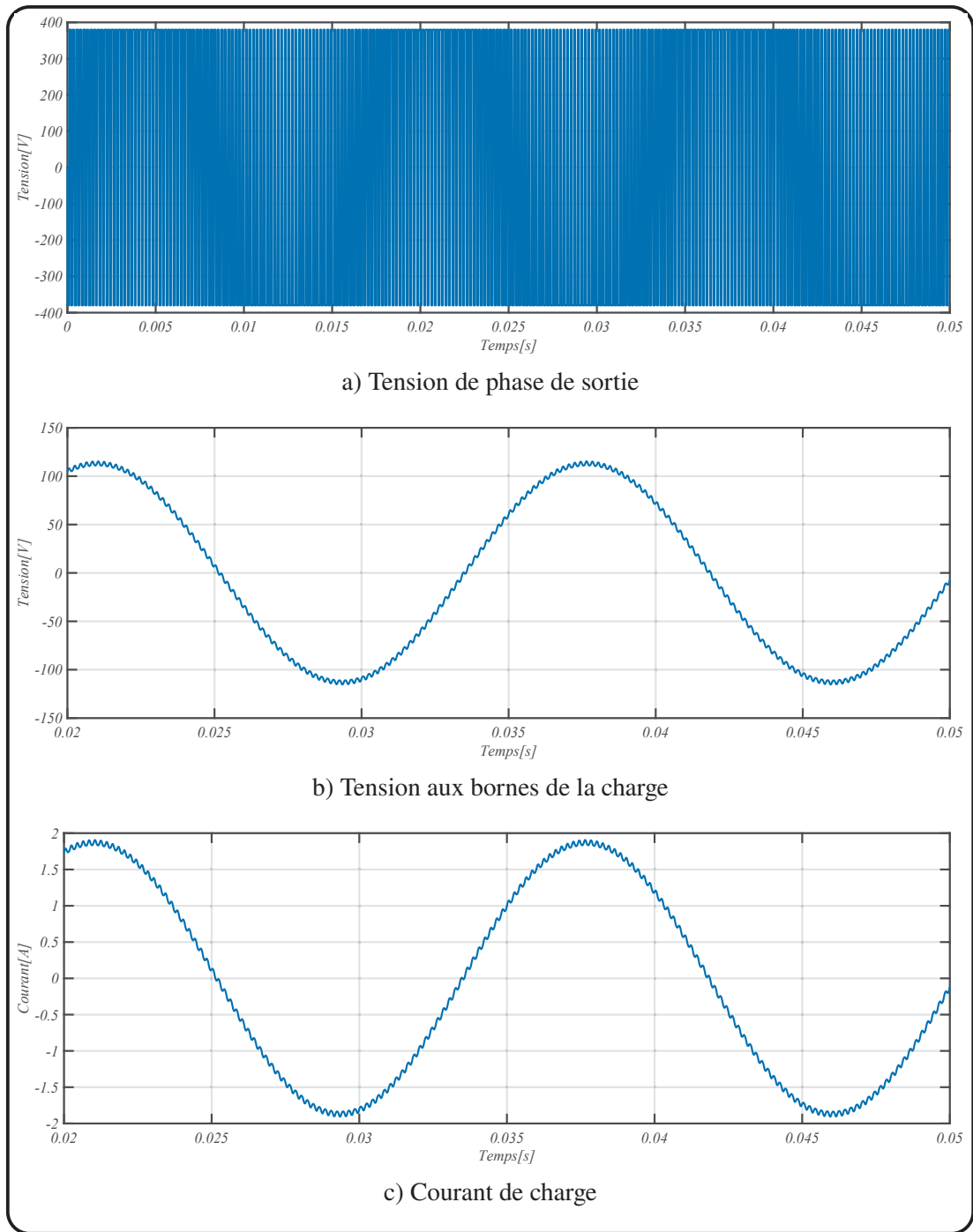


Figure 2.6 MLI bipolaire

Pour un convertisseur CC-CA en pont complet avec le schéma MLIS bipolaire, la tension de sortie varie entre $-\frac{v_{cc}}{2}$ et $\frac{v_{cc}}{2}$. La figure 2.6 illustre le signal de modulation, la tension de sortie et le courant de charge pour le schéma de modulation bipolaire sur un convertisseur CC-CA monophasé.

Dans le schéma de commutation MLIS bipolaire, un seul signal de modulation est utilisé et les interrupteurs sont activés ou désactivés conformément aux relations définies par les équations 2.11 et 2.12. La tension CC d'entrée est de 380 V et l'indice de modulation (m_i) est de 0,8. La fréquence de commutation pour la porteuse triangulaire est de 5 kHz.

En résumé, le MLIS avec commutation bipolaire simplifie le contrôle de la sortie du convertisseur CC-CA tout en présentant certaines limitations en termes de contenu harmonique. La section suivante explore la commutation unipolaire, visant à surmonter ces limitations en améliorant la qualité de la forme d'onde de sortie.

2.3.3 MLIS avec commutation unipolaire

La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale avec commutation unipolaire (MLIS unipolaire) offre des avantages significatifs en termes de réduction des harmoniques de sortie. En alternant la commutation entre les branches du convertisseur, cette technique permet d'obtenir une tension de sortie plus propre avec une distorsion harmonique réduite, ce qui est crucial pour les applications nécessitant une haute qualité de puissance. La figure 2.7 présente le schéma unipolaire pour un convertisseur CC-CA en pont complet monophasé, incluant les signaux de modulation pour les deux branches et la comparaison associée pour produire des impulsions de commutation.

Les résultats réalisés mettent en évidence le fonctionnement des dispositifs de commutation dans cette configuration spécifique. Les résultats montrent les impulsions de commande générées pour les interrupteurs S_{11} et S_{21} , tandis que les commandes des interrupteurs complémentaires sont déterminées par les relations $S_{12} = 1 - S_{11}$ et $S_{22} = 1 - S_{21}$, assurant ainsi leur fonctionnement en opposition. La figure 2.8 illustre les tensions de phase, les tensions ligne-ligne obtenues à partir d'un schéma MLI unipolaire, ainsi que le courant de charge résultant

La logique derrière la commutation des dispositifs dans la branche de gauche (phase a) est donnée par :

$$v_{\text{ref}} > v_c \Rightarrow S_{11} \text{ est activé et } v_{an} = \frac{v_{cc}}{2}, \quad (2.16)$$

$$v_{\text{ref}} < v_c \Rightarrow S_{11} \text{ est activé et } v_{an} = -\frac{v_{cc}}{2}. \quad (2.17)$$

et celle dans la branche de droite (phase b) est donnée par :

$$-v_{\text{ref}} > v_c \Rightarrow S_{21} \text{ est activé et } v_{bn} = \frac{v_{cc}}{2}, \quad (2.18)$$

$$-v_{\text{ref}} < v_c \Rightarrow S_{21} \text{ est activé et } v_{bn} = -\frac{v_{cc}}{2}. \quad (2.19)$$

Le tableau 2.1 présente l'état de commutation du MLI unipolaire et les niveaux de tension correspondants. Il est observable que lorsque les deux dispositifs supérieurs ou les deux dispositifs inférieurs sont activés, la tension de sortie est nulle.

S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	v_{an}	v_{bn}	$v_{ab} = v_{an} - v_{bn}$
ON	OFF	OFF	ON	v_{cc}	0	v_{cc}
OFF	ON	ON	OFF	0	v_{cc}	$-v_{cc}$
ON	OFF	ON	OFF	v_{cc}	v_{cc}	0
OFF	ON	OFF	ON	0	0	0

Tableau 2.1 État de commutation du MLI unipolaire et niveaux de tension correspondants

Dans le schéma de commutation unipolaire, le niveau de tension de sortie oscille entre les valeurs 0 et $-v_{cc}$, ou entre 0 et $+v_{cc}$. Cette caractéristique produit un effet de doublement effectif de la fréquence de commutation dans le spectre harmonique de sortie, comparativement au schéma de commutation bipolaire.

En d'autres termes, bien que les dispositifs de puissance commutent à la fréquence f_c , l'analyse spectrale de la tension de sortie révèle que les composantes harmoniques significatives apparaissent centrées autour de $2f_c$ et de ses multiples, et non autour de f_c comme dans la modulation bipolaire.

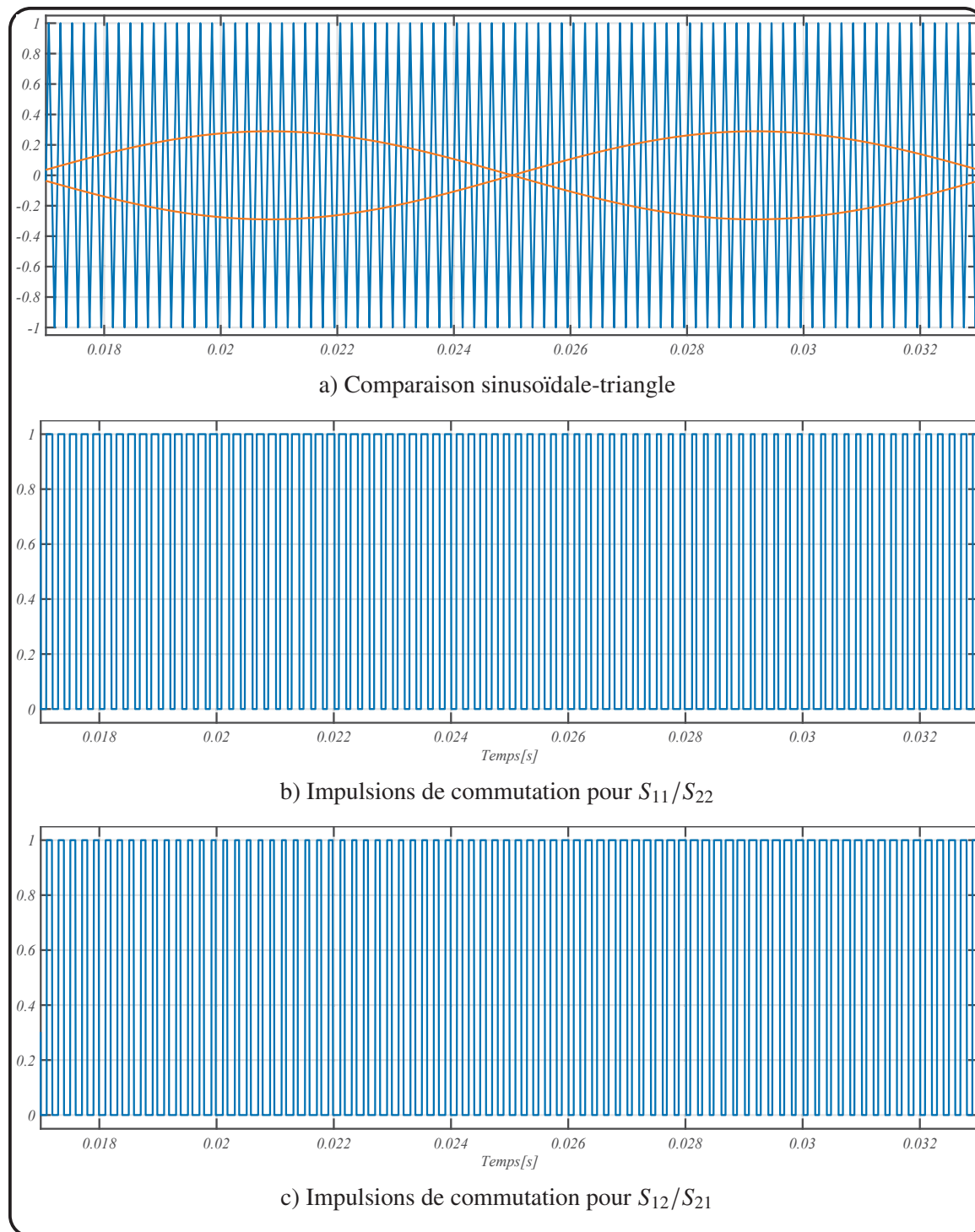


Figure 2.7 MLI unipolaire

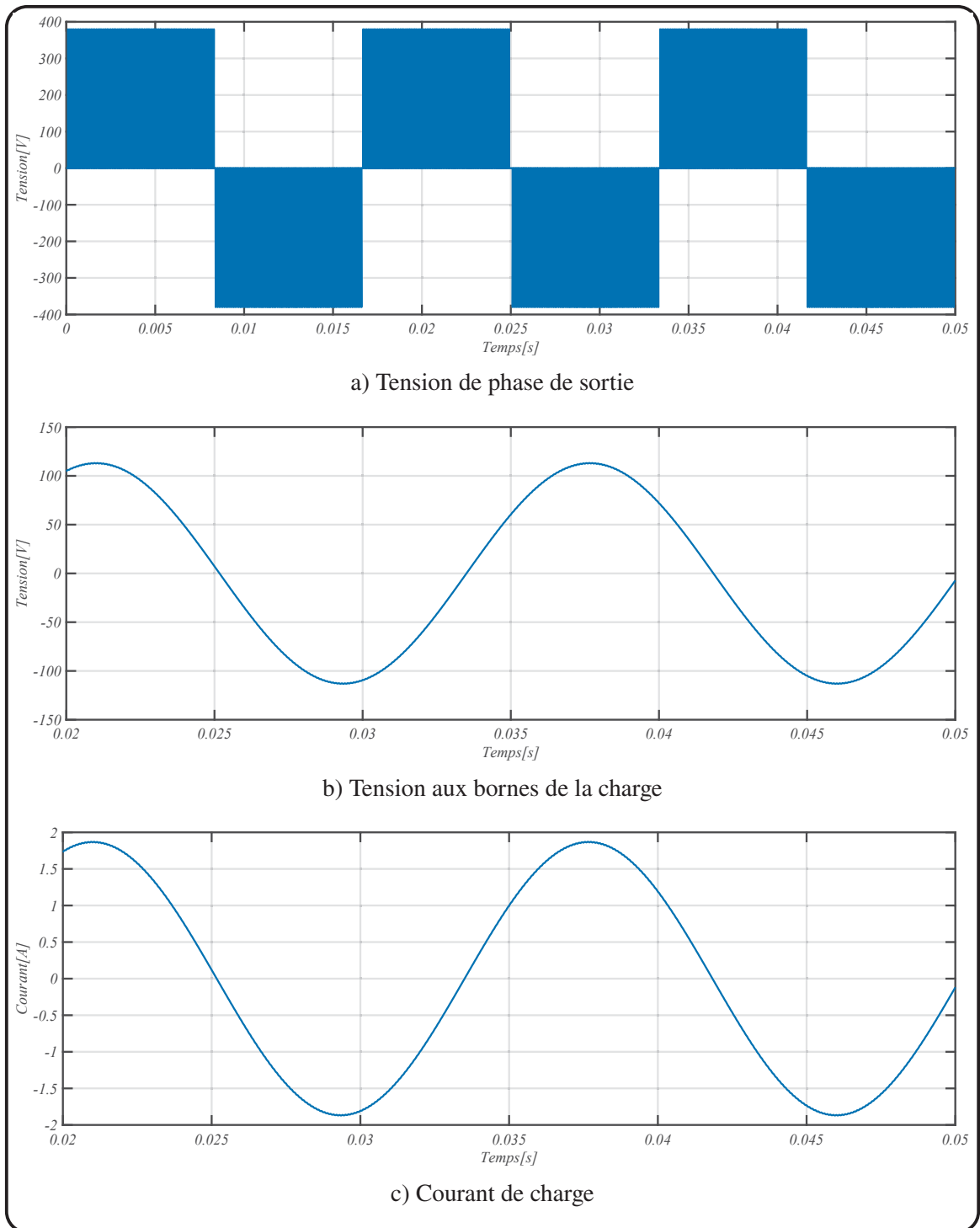


Figure 2.8 MLI unipolaire

Les formes d'onde de tension v_{an} et v_{bn} présentent un déphasage de 180° l'une par rapport à l'autre, comme illustré dans la figure 2.7.

La tension différentielle de sortie v_{ab} est représentée conjointement avec le courant de charge.

Étant donné que les composants harmoniques à la fréquence de commutation dans v_{an} et v_{bn} possèdent la même fréquence, cela entraîne l'annulation du composant harmonique à la fréquence de commutation dans la tension de sortie.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de survoler les principes de fonctionnement des convertisseurs CC-CA monophasés. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) a été explorée comme une technique efficace pour contrôler la tension de sortie des convertisseurs CC-CA sans nécessiter de composants externes. Trois schémas de MLI ont été discutés : la commutation bipolaire, la commutation unipolaire et la commutation bipolaire modifiée.

Le schéma MLIS bipolaire a été présenté comme une technique où la tension de sortie oscille entre deux niveaux, simplifiant le contrôle de la sortie du convertisseur CC-CA. Bien que ce schéma soit simple, il présente des limitations en termes de contenu harmonique et d'efficacité. Toutefois, en raison de sa simplicité de mise en œuvre, il demeure utile pour certaines applications industrielles.

Le schéma MLIS unipolaire a démontré des avantages significatifs en termes de réduction des harmoniques à la fréquence de commutation, offrant une meilleure qualité de la forme d'onde de sortie. En alternant la commutation entre les branches, ce schéma permet d'obtenir une tension de sortie avec une distorsion harmonique réduite, ce qui est crucial pour les applications nécessitant une haute qualité de puissance.

Le schéma de commutation bipolaire modifié a été analysé comme une technique optimisée permettant d'améliorer la composante fondamentale de la tension de sortie, particulièrement dans la région de modulation linéaire. Ce schéma tire parti des avantages de la commutation

bipolaire tout en introduisant des modifications visant à maximiser l'efficacité et la qualité de la puissance délivrée.

Enfin, le concept de MLI basé sur la porteuse généralisé a été introduit, offrant une flexibilité accrue dans la synthèse des tensions de sortie et permettant une optimisation des performances du convertisseur CC-CA. En utilisant des techniques de transformation de référence et de vecteur d'espace, ce schéma permet de générer des tensions de sortie avec une grande précision, adaptées à une variété d'applications industrielles et commerciales.

Pour le développement de solutions plus robustes, il est essentiel de disposer d'une modélisation mathématique précise du système dans son ensemble. Cette modélisation doit prendre en compte non seulement les caractéristiques des convertisseurs CC-CA, mais également les interactions dynamiques entre les différents composants du MR.

Le chapitre suivant propose un cadre mathématique complet pour la modélisation des convertisseurs CC-CA monophasés dans le référentiel rotatif. Cette approche permettra d'analyser en profondeur les phénomènes de couplage entre puissances active et réactive, ouvrant la voie au développement de stratégies de contrôle plus sophistiquées. La modélisation développée servira de base théorique pour la conception du contrôleur neuronal adaptatif présenté ultérieurement.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DU CONVERTISSEUR CC-CA MONOPHASÉ DANS LE RÉFÉRENTIEL ROTATIF

3.1 Introduction

Les chapitres antérieurs ont établi les bases théoriques des MRs et examiné les techniques classiques de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Pour optimiser les performances des convertisseurs CC-CA, en particulier dans les conditions complexes des MRs basse tension, une modélisation précise de leur comportement dynamique s'avère indispensable.

Ce chapitre présente un cadre mathématique rigoureux destiné à modéliser les convertisseurs CC-CA monophasés dans le référentiel rotatif synchrone. L'objectif est de capturer avec exactitude les interactions dynamiques entre les composants du système, notamment le couplage entre puissances active et réactive, un défi majeur en basse tension Ashtiani *et al.* (2022); Kalla, Singh, Murthy, Jain & Kant (2018); Siu & Ho (2020); Micallef, Apap, Spiteri-Staines & Guerrero (2015). L'originalité réside dans l'application du référentiel synchrone aux systèmes monophasés, généralement réservée aux triphasés. Cette modélisation constitue la base théorique nécessaire pour le développement ultérieur d'une stratégie de contrôle innovante par réseaux de neurones.

La transformation vers un référentiel synchrone offre de nombreux avantages, tels que la simplification de la génération des signaux de commande et l'amélioration du contrôle dynamique, permettant de surmonter les limites des techniques MLI dépendant fortement de la précision du modèle et de la capacité à traiter les grandeurs alternatives. Cependant, l'application aux systèmes monophasés présente des défis spécifiques liés à l'absence de phases multiples pour générer les composantes orthogonales nécessaires aux transformations de Clarke et de Park.

Pour contourner ces problématiques, une stratégie prometteuse consiste à générer une composante orthogonale virtuelle, créant ainsi un système équivalent à celui obtenu par la transformation de Clarke en triphasé. Cette approche facilite par la suite l'application de la transformation de

Park pour accéder au référentiel synchrone. L'implémentation du *Second-Order Generalized Integrator - Quadrature Signal Generator* (SOGI-QSG) joue un rôle clé dans ce processus.

La démarche adoptée s'articule autour de quatre axes principaux :

- Analyse approfondie des problématiques spécifiques aux transformations dans les systèmes monophasés,
- Développement d'une méthodologie robuste pour la génération de composantes orthogonales stationnaires,
- Implémentation du *Second-Order Generalized Integrator - Quadrature Signal Generator* (SOGI-QSG),
- Élaboration de la transformation vers le référentiel rotatif dq et analyse des modèles résultants.

Premièrement, une analyse détaillée des enjeux liés à l'implémentation des transformations dans les systèmes monophasés est présentée, suivie par le développement progressif des modèles mathématiques correspondants. Une attention particulière est accordée à la validation des modèles pour les deux modes de fonctionnement du convertisseur, établissant ainsi une base solide pour la conception des stratégies de contrôle qui seront développées dans les chapitres suivants.

3.2 Synthèse de phases orthogonales dans les systèmes monophasés via SOGI-QSG

L'adaptation des systèmes monophasés aux exigences de la transformation dq synchronisée représente une tâche complexe en raison de l'unique phase disponible. Cette singularité complique l'analyse et le contrôle des convertisseurs de puissance, nécessitant la génération d'une composante orthogonale pour les transformations vectorielles. Afin de contourner cette contrainte, il est impératif de générer une phase orthogonale additionnelle pour chaque variable d'état du circuit.

Cette section présente les techniques permettant de créer ces phases orthogonales, en se concentrant sur l'utilisation du *Second-Order Generalized Integrator - Quadrature Signal Generator* (SOGI-QSG).

3.2.1 Techniques de synthèse de phases orthogonales

Dans les systèmes monophasés, la génération de variables d'état en déphasage est essentielle pour appliquer des transformations vectorielles, telles que la transformation de Park. Diverses méthodologies peuvent être mises en œuvre pour élaborer ces variables d'état à partir d'un signal monophasé de convertisseur CC-CA. Les principales techniques incluent :

1. **Différenciation des Paramètres de Sortie** : Cette technique implique la dérivation de la composante réelle mesurée afin d'obtenir une composante orthogonale stationnaire. Toutefois, cette méthode est sensible aux perturbations telles que le bruit et les harmoniques dans le signal de sortie du convertisseur. De plus, les opérations de dérivation exigent un temps de traitement conséquent et peuvent induire des erreurs notables.
2. **Retarder le Signal Original d'un Quart de Période** : Cette technique crée une deuxième composante en retardant le signal original d'un quart de période. En retardant le signal d'origine de 90 degrés (un quart de période d'un signal sinusoïdal), une composante orthogonale est générée, essentielle pour les transformations vectorielles. Bien que relativement simple à implémenter, cette méthode peut introduire des erreurs si le signal est sujet à des variations rapides ou des perturbations, nécessitant des techniques de filtrage pour améliorer la précision.
3. **Création d'un Observateur pour la Composante β** : Cette stratégie consiste à concevoir un observateur pour produire la composante β . Bien que potentiellement efficace, sa mise en place est complexe en raison des besoins élevés en traitement et en logiciel. Les observateurs doivent être finement élaborés et calibrés pour suivre avec exactitude les dynamiques du système, représentant ainsi un défi technique considérable.
4. **Techniques Basées sur les Intégrateurs Généralisés** : Ces techniques utilisent des intégrateurs généralisés pour produire des composantes orthogonales $\alpha\beta$ à partir d'un signal d'entrée monophasé, tout en atténuant le bruit et en filtrant efficacement les harmoniques.

Ces techniques visent à créer une composante orthogonale déphasée de 90° par rapport au signal original, permettant ainsi l'application des transformations vectorielles pour une analyse et un contrôle plus efficaces des convertisseurs CC-CA.

3.2.2 Mise en oeuvre du SOGI-QSG

Parmi les techniques basées sur les intégrateurs généralisés, le SOGI-QSG se distingue par son efficacité à créer une phase orthogonale fictive à partir d'un signal d'entrée monophasé. Ce générateur est capable de produire les composantes $\alpha\beta$ tout en atténuant le bruit et en filtrant efficacement les harmoniques. Sa facilité d'implémentation et son efficacité le rendent particulièrement adapté à cette application.

3.2.2.1 Fonctionnement du SOGI-QSG

Le SOGI-QSG fonctionne grâce à un intégrateur généralisé de second ordre qui isole les composantes orthogonales $\alpha\beta$ du signal d'entrée. Ce processus assure une grande précision et une réduction significative des perturbations et des harmoniques Chen *et al.* (2021). Le SOGI-QSG convertit le signal d'entrée en une composante α , identique au signal initial, et en une composante β , décalée de 90° par rapport à α .

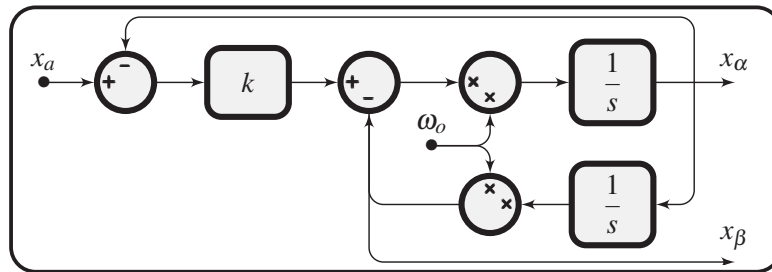


Figure 3.1 Schéma bloc du SOGI-QSG

Le dispositif du SOGI-QSG se compose de deux éléments clés, comme illustré à la figure 3.1 :

- **Intégrateur Généralisé de Second Ordre (SOGI)** : Cet intégrateur extrait la composante principale du signal d'entrée et la décale de 90° , générant ainsi la composante β nécessaire pour les transformations vectorielles.
- **Procédé de Filtrage et de Calibration** : Les signaux obtenus sont filtrés et calibrés pour maximiser la précision. Ce filtrage élimine les nuisances et les harmoniques, fournissant des signaux nets et précis pour l'analyse et le contrôle.

Les fonctions de transfert reliant l'entrée aux sorties sont exprimées par les équations suivantes :

$$Y(s) = \frac{x_\alpha(s)}{x_a(s)} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.1)$$

$$Z(s) = \frac{x_\beta(s)}{x_a(s)} = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.2)$$

Les diagrammes de Bode des fonctions de transfert $Y(s)$ et $Z(s)$ sont présentés dans la figure 3.2. Dans ces équations, ω_0 représente la pulsation de résonance (en rad/s) correspondant à la fréquence fondamentale ciblée, tandis que k est le facteur d'amortissement qui détermine la sélectivité du filtre.

L'analyse des courbes révèle que $Y(s)$, représentée en bleu, se comporte comme un filtre passe-bande centré sur la fréquence ω_0 . À cette fréquence précise, le gain est unitaire (0 dB) et le déphasage est nul, confirmant que la sortie x_α constitue une version filtrée de l'entrée qui préserve l'amplitude et la phase du signal fondamental. Par ailleurs, $Z(s)$, représentée en orange, fonctionne comme un filtre passe-bas avec une résonance à ω_0 , produisant un gain unitaire et un déphasage exactement de -90° , générant ainsi la composante en quadrature x_β .

La largeur des pics de résonance, directement influencée par le paramètre k , détermine la capacité du filtre à rejeter les harmoniques : une valeur faible de k produit une sélectivité élevée mais ralentit la réponse dynamique, tandis qu'une valeur élevée accélère la réponse transitoire au détriment de la sélectivité fréquentielle.

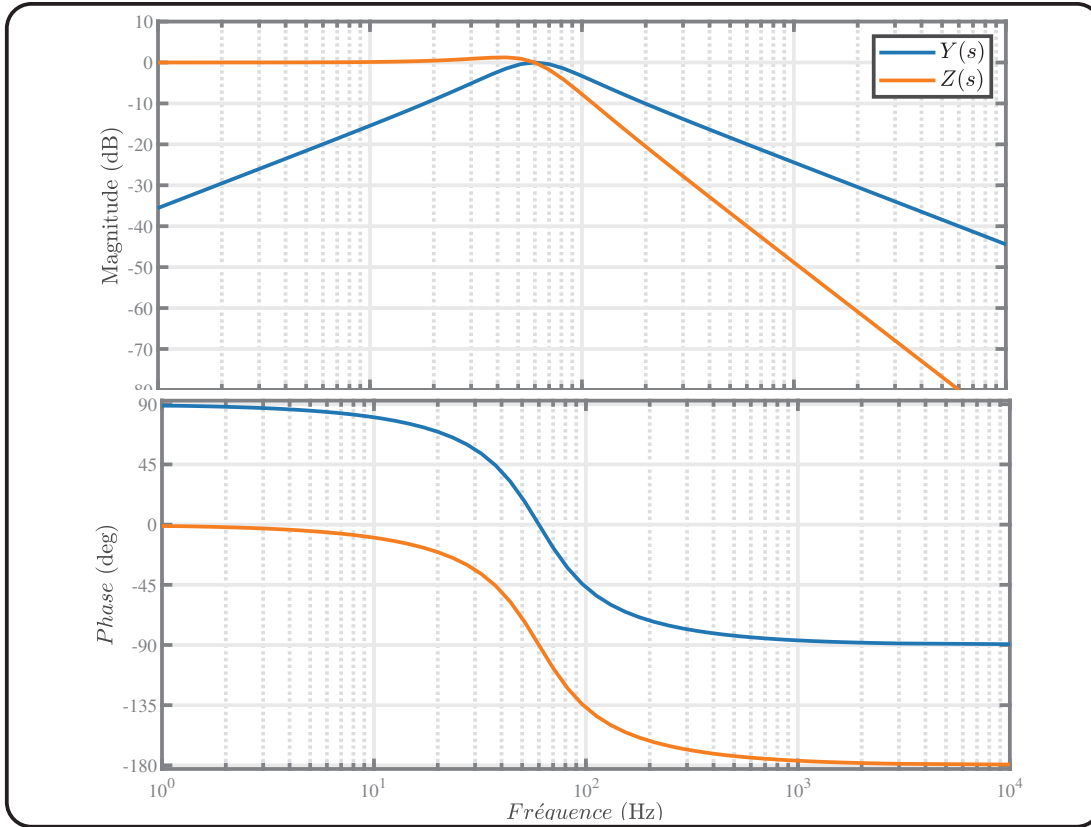


Figure 3.2 Diagrammes de bode du SOGI-QSG

3.2.2.2 Formules mathématiques du SOGI-QSG

Pour un signal d'entrée $x_a(t)$, les formules du SOGI s'énoncent comme suit :

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega_o^2 y(t) = \omega_o x_a(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \omega_o z(t) \quad (3.4)$$

où $y(t)$ représente la sortie de l'intégrateur, $z(t)$ la sortie dérivée, et ω_o la fréquence angulaire de base.

Les composantes $\alpha\beta$ sont obtenues de la manière suivante :

$$x_\alpha(t) = y(t) \quad (3.5)$$

$$x_\beta(t) = z(t) \quad (3.6)$$

Ces formules illustrent la capacité du SOGI-QSG à transformer le signal d'entrée en deux composantes orthogonales, indispensables aux transformations vectorielles dans les systèmes monophasés.

3.2.2.3 Mise en oeuvre du SOGI-QSG dans MATLAB/SIMULINK

Pour valider l'efficacité du SOGI-QSG, une implémentation a été réalisée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cette implémentation génère les composantes $\alpha\beta$ à partir d'un signal monophasé, cruciales pour les transformations vectorielles et l'analyse des systèmes de conversion d'énergie.

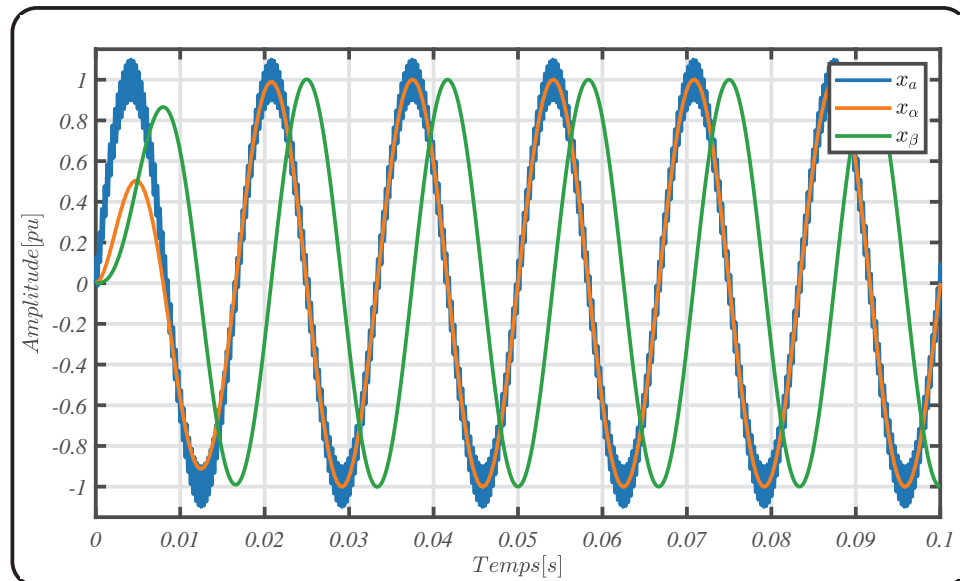


Figure 3.3 Résultats de l'implémentation du SOGI-QSG dans MATLAB/SIMULINK

Les résultats montrent que la composante α suit fidèlement les variations du signal d'entrée, tandis que la composante β maintient un déphasage constant de 90° . Le signal d'entrée utilisé pour cette simulation est fortement bruité, comme illustré dans la figure 3.3, démontrant l'efficacité du SOGI-QSG à filtrer le bruit et à produire des composantes orthogonales précises.

Comme le montre la figure 3.3, la composante α suit fidèlement les variations du signal d'entrée, tandis que la composante β maintient un déphasage constant de 90° . Les composantes générées sont bien filtrées, avec une réduction significative des interférences et des harmoniques indésirables. Cela est essentiel pour les applications de contrôle et d'analyse des systèmes monophasés.

La simulation dans MATLAB/SIMULINK permet de valider les performances du SOGI-QSG en temps réel, en démontrant sa capacité à réagir rapidement aux changements du signal d'entrée tout en maintenant la stabilité et la précision des composantes générées.

3.3 Optimisation des convertisseurs CC-CA par la transformation de Park

Cette section vise à approfondir et appliquer spécifiquement la transformation de Park dans le contexte des convertisseurs CC-CA monophasés. Bien que cette transformation soit un concept connu en électrotechnique, son application aux systèmes monophasés utilisant le SOGI-QSG représente une approche particulière qui mérite une attention détaillée.

L'objectif est double : d'abord, consolider les fondements théoriques de cette transformation en l'expliquant de manière intuitive et mathématique pour assurer une compréhension solide ; ensuite, démontrer son utilité pratique à travers des simulations qui serviront de base aux stratégies de contrôle avancées développées dans les sections suivantes. Cette compréhension approfondie est cruciale car la transformation de Park constitue le pont conceptuel entre l'acquisition des signaux et la conception des contrôleurs que nous aborderons ultérieurement.

La transformation de Park joue un rôle pivot dans l'optimisation des systèmes électriques, en convertissant les composantes $\alpha\beta$, issues du SOGI-QSG, en un référentiel tournant synchronisé.

Cette opération mathématique est fondamentale pour simplifier la gestion des systèmes électriques, en transformant les grandeurs du référentiel stationnaire en grandeurs continues dans le référentiel tournant, particulièrement utile en régime permanent.

3.3.1 Fondements de la transformation de Park

La transformation de Park est une technique essentielle pour l'analyse et le contrôle des systèmes électriques. Pour mieux comprendre cette transformation, une analogie simple est pertinente : considérer la rotation d'un ventilateur. Observé depuis une position fixe, les pales du ventilateur semblent aller et venir. Cependant, en orientant le point de vue de manière à tourner à la même vitesse que les pales, celles-ci apparaissent immobiles. La transformation de Park fonctionne de manière similaire, en transformant les composantes $\alpha\beta$ d'un système électrique en composantes continues dq dans un référentiel qui tourne à la même vitesse que le signal.

La transformation de Park projette les composantes $\alpha\beta$ sur un axe tournant à une vitesse angulaire ω , les transformant en composantes continues dq si la vitesse angulaire est appropriée. Ces nouvelles composantes sont plus faciles à gérer pour les contrôleurs, notamment en régime permanent.

Les formules de transformation s'énoncent comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \mathcal{T} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

et :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \mathcal{T}^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

où $\mathcal{T}$ représente la matrice de transformation :

$$\mathcal{T} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

et $\mathcal{T}^{-1}$ sa matrice inverse :

$$\mathcal{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ces formules de transformation permettent de simplifier considérablement le contrôle des systèmes électriques. En transformant un signal monophasé représenté par les composantes α et β , l'application de la matrice de transformation $\mathcal{T}$ permet d'obtenir les composantes d et q , qui tournent à la même vitesse que le signal d'origine. Cette transformation facilite les calculs et le contrôle en convertissant les signaux en valeurs continues plus faciles à gérer.

En transformant les grandeurs alternatives en grandeurs continues, la transformation de Park contribue à maintenir la stabilité et à optimiser les performances des systèmes électriques.

3.3.2 Application et validation de la transformation de Park

L'application pratique de la transformation de Park a été réalisée via matlab, en synergie avec le SOGI-QSG, afin de confirmer le comportement attendu. La figure 3.4 illustre les composantes dq dans le référentiel tournant, obtenues grâce à matlab. Les résultats montrent que les composantes dq atteignent rapidement un état stable, témoignant de la réactivité et de la précision de la technique. En d'autres termes, cette méthode permet de stabiliser rapidement les signaux sinusoïdaux variables dans le temps en les convertissant en grandeurs continues dans le référentiel dq , ce qui est crucial pour l'implémentation d'un contrôle précis basé sur des régulateurs classiques.

La composante d reflète la partie active du signal, tandis que la composante q représente la partie réactive. Ces deux composantes sont essentielles à l'optimisation des convertisseurs de puissance, permettant une gestion plus précise de l'énergie.

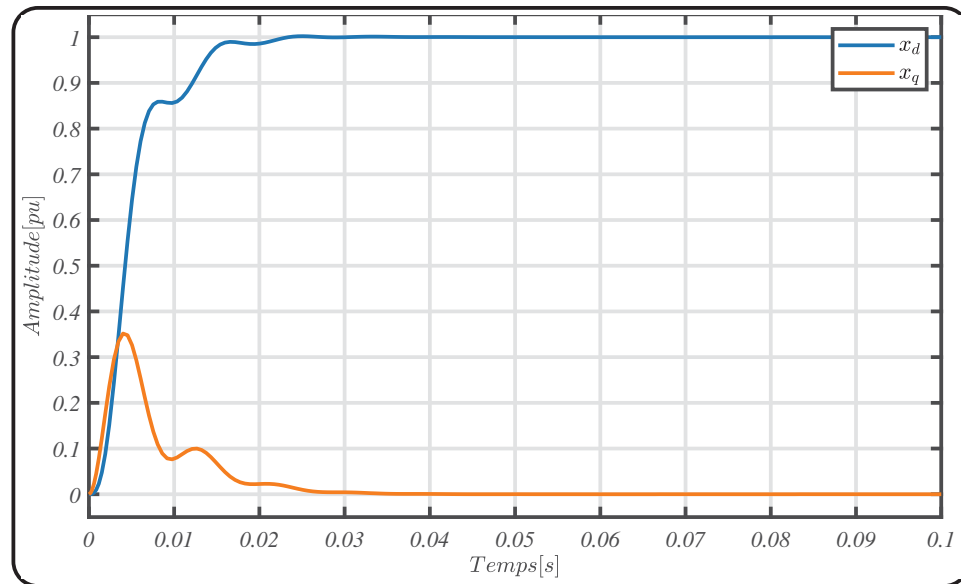


Figure 3.4 Visualisation des composantes dq via matlab

3.3.3 Bénéfices de la transformation de Park pour les systèmes monophasés

L'alliance du SOGI-QSG et de la transformation de Park offre de multiples avantages :

- **Analyse Simplifiée** : La transformation de Park convertit les grandeurs alternatives fluctuantes en grandeurs continues stables. Cela permet de transformer des signaux électriques en valeurs fixes et faciles à analyser, simplifiant ainsi les calculs et les ajustements nécessaires pour le développement des systèmes de contrôle.
- **Découplage et précision du contrôle** : La transformation $qd0$ isole les composantes active (d) et réactive (q) du courant, permettant un pilotage indépendant et extrêmement précis de chacune. Ce découplage renforce la stabilité du système et optimise son efficacité.
- **Minimisation des Erreurs** : La transformation en composantes continues réduit les erreurs causées par les variations de phase et de fréquence, sous condition que la PLL soit parfaitement synchronisé. Lorsque cette condition est satisfaite, la transformation des signaux variables en valeurs continues minimise les erreurs de calcul, garantissant ainsi un contrôle optimal et améliorant l'efficacité énergétique du système.

L'application de la transformation de Park, combinée au SOGI-QSG, permet de surmonter les défis des systèmes monophasés. Cette approche facilite non seulement l'analyse des systèmes, mais elle améliore également la précision et l'efficacité du contrôle des convertisseurs de puissance.

3.4 Analyse et modélisation d'un convertisseur CC-CA monophasé

Cette section présente une modélisation approfondie d'un convertisseur CC-CA monophasé, exploitant les référentiels stationnaire et rotatif. Cette modélisation est fondamentale car elle établit les bases mathématiques nécessaires pour développer des stratégies de contrôle efficaces et robustes pour les convertisseurs de puissance. L'intégration du SOGI-QSG pour la dérivation des phases orthogonales et l'utilisation de la transformation de Park pour la transition vers le référentiel rotatif constituent des étapes clés qui permettront, dans les sections suivantes, de concevoir des régulateurs performants, d'optimiser la génération des signaux de commande MLI et d'améliorer la qualité de l'énergie fournie. Cette approche méthodique nous conduira progressivement des équations fondamentales du système vers l'implémentation pratique des algorithmes de contrôle avancés.

3.4.1 Modélisation en mode autonome du convertisseur CC-CA monophasé

Un convertisseur CC-CA monophasé est un dispositif utilisé pour transformer une tension continue (CC), telle que celle fournie par une batterie, en une tension alternative (CA), utilisée dans la plupart des appareils domestiques et commerciaux. En mode autonome, le convertisseur fonctionne indépendamment du réseau électrique, ce qui est souvent le cas dans les systèmes d'alimentation sans interruption (UPS) et les installations solaires.

3.4.1.1 Modélisation en mode autonome dans le référentiel stationnaire

La figure 3.5 représente le circuit d'un convertisseur CC-CA monophasé fonctionnant en mode autonome. Les composants clés comprennent un circuit LC de filtre (constitué de l'inductance (L_f) et de sa résistance parasite (R_{L_f}), ainsi que du condensateur (C), et une charge ((Z)).

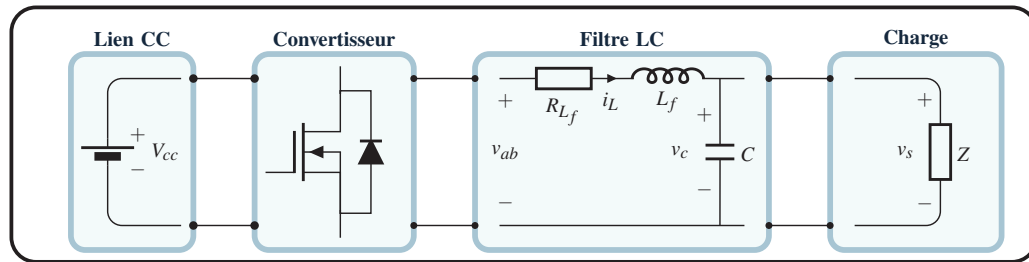


Figure 3.5 Circuit d'un convertisseur CC-CA monophasé en mode autonome

Les dynamiques du convertisseur en mode autonome sont décrites par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{ZC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{cc}}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.11)$$

où u représente la tension d'entrée commandée par les interrupteurs du convertisseur. Ces équations montrent comment le courant (i_L) et la tension (v_c) évoluent dans le temps en fonction des composants du circuit.

Pour simplifier l'analyse, le SOGI-QSG est utilisé pour extraire les composantes orthogonales $\alpha\beta$ du signal d'entrée monophasé (x_a).

Les équations obtenues sont alors :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_\alpha} \\ \dot{i}_{L_\beta} \\ \dot{v}_{c_\alpha} \\ \dot{v}_{c_\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{L_f}}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_\alpha} \\ i_{L_\beta} \\ v_{c_\alpha} \\ v_{c_\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{cc}}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{v_{cc}}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Ces équations décrivent le comportement du convertisseur dans le référentiel stationnaire, en utilisant les composantes $\alpha\beta$ obtenues grâce au SOGI-QSG.

3.4.1.2 Modélisation en mode autonome dans le référentiel rotatif

Pour simplifier davantage l'analyse, la transformation de Park est appliquée. La transformation de Park permet de projeter les composantes $\alpha\beta$ dans un référentiel rotatif synchronisé, transformant ainsi les variables du référentiel stationnaire en variables continues dans le référentiel rotatif.

L'équation suivante est obtenue en appliquant la transformation dq à (3.12) :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_d} \\ \dot{i}_{L_q} \\ \dot{v}_{c_d} \\ \dot{v}_{c_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_{L_f}}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_d} \\ i_{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{o_d} \\ v_{o_q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

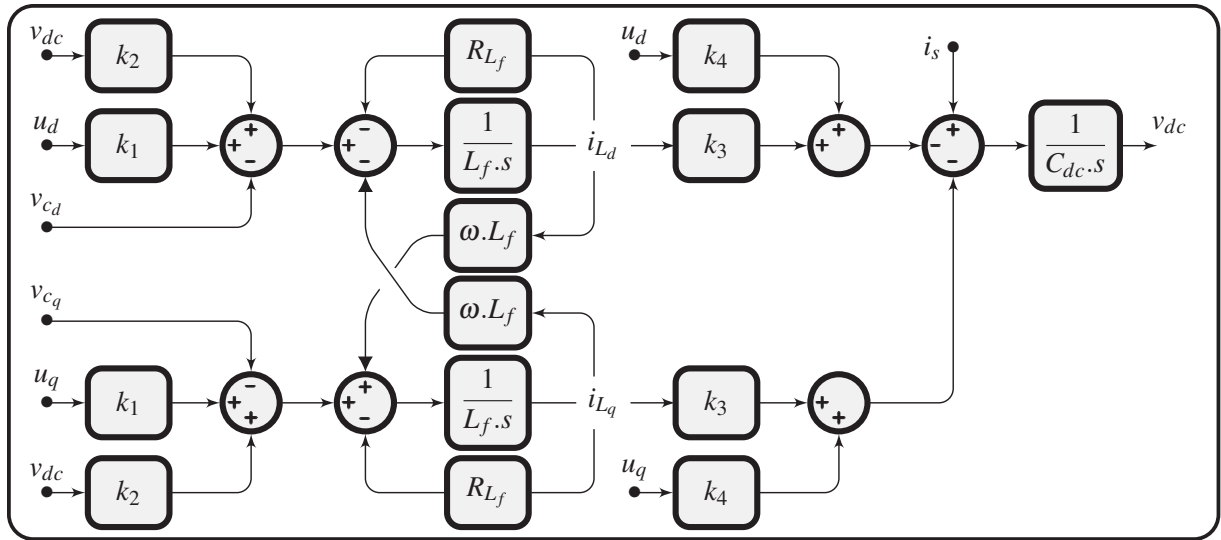


Figure 3.6 Représentation dq du convertisseur CC-CA monophasé en interaction avec le réseau

3.4.2 Modélisation d'un convertisseur CC-CA monophasé en interaction avec le réseau électrique

La modélisation d'un convertisseur CC-CA monophasé en interaction avec le réseau présente des défis distincts par rapport au mode autonome. Lorsqu'un convertisseur CC-CA monophasé est connecté au réseau, il doit réguler le courant qu'il injecte dans le réseau pour alimenter les charges distantes, tout en respectant les contraintes imposées par la tension du réseau qui est fixée par l'opérateur du réseau électrique. Cette synchronisation avec la phase et la fréquence du réseau est essentielle pour maintenir la stabilité du système interconnecté et assurer une alimentation électrique fiable. Cette section développe les équations différentielles et les modèles correspondants pour capturer ces dynamiques, en tenant compte des éléments clés tels que l'inductance de lissage, la résistance associée, le condensateur de filtrage et l'impédance de la charge.

3.4.2.1 Approche stationnaire du convertisseur CC-CA monophasé

La figure 3.7 présente le schéma électrique d'un convertisseur CC-CA monophasé en mode connecté au réseau, intégrant des éléments tels que l'inductance de lissage (L_f), la résistance associée (R_{L_f}), le condensateur de filtrage (C), et l'impédance de la charge (Z). La modélisation s'appuie sur les équations différentielles régissant ces composants.

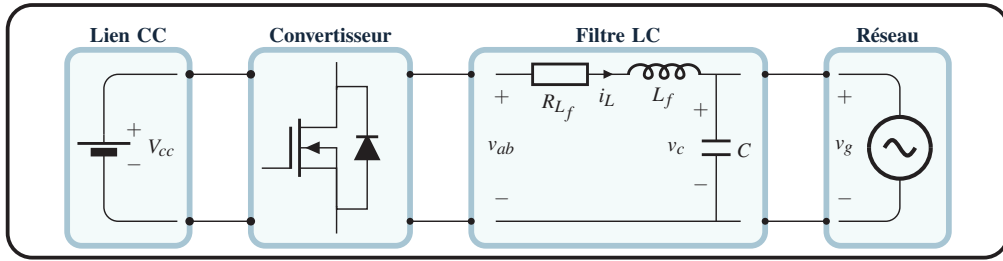


Figure 3.7 Circuit d'un convertisseur CC-CA monophasé en mode réseau

Les dynamiques du convertisseur en interaction avec le réseau sont décrites par l'équation suivante :

$$\dot{i}_L = -\frac{R_{L_f}}{L_f} i_L + \frac{1}{L_f} u - \frac{1}{L_f} v_g \quad (3.14)$$

Cette formulation linéarisée facilite l'analyse du comportement du convertisseur sous différentes conditions de fonctionnement. Le SOGI-QSG est employé pour extraire les composantes orthogonales $\alpha\beta$ du signal d'entrée monophasé.

Les équations résultantes sont :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_\alpha} \\ \dot{i}_{L_\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{L_f}}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_\alpha} \\ i_{L_\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{g_\alpha} \\ v_{g_\beta} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Ces équations modélisent le convertisseur dans le référentiel stationnaire en interaction avec le réseau électrique.

3.4.2.2 Modélisation rotative du convertisseur CC-CA monophasé

Afin de simplifier l'analyse, la transformation de Park est appliquée. Cette transformation projette les composantes $\alpha\beta$ sur un référentiel rotatif synchronisé, transformant ainsi les variables du référentiel stationnaire en variables continues dans le référentiel rotatif.

L'équation dynamique suivante est obtenue en appliquant la transformation dq (3.15) :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_d} \\ \dot{i}_{L_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_{L_f}}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_d} \\ i_{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{o_d} \\ v_{o_q} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.5 Implications pratiques pour le contrôle du convertisseur

La modélisation dans le référentiel rotatif offre des avantages significatifs pour l'implémentation des stratégies de contrôle, particulièrement en ce qui concerne les techniques MLI présentées précédemment.

La transformation dans le référentiel dq permet d'optimiser la génération des signaux MLI de plusieurs manières :

- **Simplification du Calcul des Rapports Cycliques** : Les composantes dq , étant continues en régime permanent, simplifient le calcul des rapports cycliques, le rendant plus direct et précis.
- **Amélioration de la Réponse Dynamique** : Le contrôle dans le référentiel dq permet une meilleure gestion des transitoires car il transforme les variables sinusoïdales en grandeurs continues, ce qui rend la conception des régulateurs PI beaucoup plus efficace. Les régulateurs PI peuvent ainsi atteindre une erreur statique nulle en régime permanent pour des grandeurs continues, contrairement aux grandeurs alternatives où ils présentent toujours une erreur de traînage.

- **Réduction des Distorsions** : La décomposition en composantes directe et quadrature facilite la compensation des harmoniques en permettant l'identification précise et le filtrage sélectif des harmoniques spécifiques. Cette séparation transforme les harmoniques de rang n dans le référentiel abc en harmoniques de rang $n \pm 1$ dans le référentiel dq , ce qui permet de les cibler avec des filtres résonants calibrés pour ces fréquences spécifiques.

L'utilisation du modèle dq pour la commande du convertisseur nécessite certaines précautions :

- **Synchronisation** : Une synchronisation précise avec la fréquence et la phase du réseau est essentielle. Le SOGI-QSG joue un rôle crucial dans cette synchronisation, et sa précision détermine directement la stabilité du contrôle. Toute erreur de synchronisation peut entraîner des oscillations indésirables et dégrader les performances du système.
- **Temps de Calcul** : L'implémentation des transformations nécessite une puissance de calcul supplémentaire. Ceci peut avoir un impact sur le temps de boucle du contrôle et donc la fréquence de commutation.
- **Fréquence d'Échantillonnage** : Elle doit être suffisamment élevée pour assurer une reconstruction précise des signaux.

L'intégration de la modélisation dq avec les stratégies MLI permet :

- Un meilleur contrôle de la tension et du courant,
- Une réduction du TDH en régime permanent,
- Une amélioration de la réponse aux perturbations.

3.6 Conclusion

La modélisation mathématique développée dans ce chapitre établit une base théorique solide pour comprendre le comportement des convertisseurs CC-CA monophasés dans le référentiel rotatif. L'analyse détaillée des équations dynamiques met en lumière la complexité des interactions entre les variables d'état, particulièrement dans les conditions d'impédance mixte des réseaux basse tension.

Cette compréhension approfondie des mécanismes de couplage entre puissances active et réactive ouvre la voie au développement d'une stratégie de contrôle innovante. Le modèle mathématique permet d'identifier avec précision les points critiques nécessitant une attention particulière dans la conception du contrôleur, notamment la gestion dynamique des références de tension sur les axes d et q .

La méthodologie présentée s'articule autour de deux concepts principaux :

1. **Mise en Œuvre du SOGI-QSG** : Cette technique innovante génère des composantes orthogonales $\alpha\beta$ à partir d'un signal monophasé, tout en assurant :
 - Une extraction précise des composantes fondamentales,
 - Une atténuation efficace des perturbations et harmoniques,
 - Une adaptation dynamique aux variations du signal d'entrée.
2. **Application de la Transformation de Park** : La conversion vers le référentiel rotatif dq a été réalisée avec succès, permettant :
 - La transformation des grandeurs alternatives en composantes continues,
 - Une simplification significative de l'analyse du système,
 - Une base solide pour la conception des contrôleurs.

Les modèles développés couvrent les deux modes opératoires essentiels du convertisseur :

- **Mode Autonome** : Modélisation complète intégrant les dynamiques du filtre LC,
- **Mode Connecté au Réseau** : Prise en compte des interactions avec le réseau électrique.

Cette modélisation ouvre la voie au développement des stratégies de contrôle qui seront présentées dans le chapitre suivant. La conception des contrôleurs, basée sur le référentiel dq , pourra s'appuyer sur ces modèles pour :

- Améliorer les performances dynamiques du convertisseur,
- Optimiser la qualité de l'énergie électrique,
- Garantir la stabilité dans différentes conditions de fonctionnement,
- Réduire l'impact des perturbations et des variations de charge.

Le chapitre suivant exploite ces fondements théoriques pour développer des stratégies de contrôle avancées. L'accent sera mis sur l'exploitation optimale du référentiel dq afin de concevoir des contrôleurs performants, capables de maintenir la stabilité du système tout en assurant une haute qualité de l'énergie électrique fournie, que ce soit en mode autonome ou connecté au réseau.

CHAPITRE 4

CONCEPTION DU CONTRÔLEUR POUR LE CONVERTISSEUR CC-CA MONOPHASÉ DANS LE RÉFÉRENTIEL ROTATIF

4.1 Introduction

Le chapitre précédent a établi un modèle mathématique détaillé des convertisseurs CC-CA monophasés dans le référentiel rotatif, révélant la complexité des interactions entre les variables du système, en particulier dans les conditions d'impédance mixte des MRs basse tension. Fort de cette compréhension approfondie, ce chapitre vise à développer une architecture de contrôle innovante, spécifiquement adaptée aux défis des MRs modernes.

L'objectif principal est de concevoir des contrôleurs robustes et précis pour les convertisseurs CC-CA monophasés, en se concentrant sur deux modes de fonctionnement essentiels :

1. **Mode autonome** : Le convertisseur fonctionne indépendamment du réseau électrique.
2. **Mode connecté au réseau** : Le convertisseur interagit avec le réseau électrique.

L'approche proposée s'appuie sur l'exploitation optimale du référentiel rotatif synchrone pour le contrôle des systèmes monophasés. Cette conception novatrice établit les bases nécessaires pour l'intégration ultérieure des techniques d'intelligence artificielle, qui seront développées dans le chapitre suivant.

La méthodologie adoptée repose sur l'utilisation de contrôleurs proportionnel-intégral (PI), reconnus pour leur capacité à fournir un contrôle stable et précis. La sélection des paramètres de ces contrôleurs s'appuie sur une analyse fréquentielle approfondie, qui étudie la réponse du système à différentes fréquences de perturbation. Une analyse temporelle complémentaire permet d'évaluer la performance dynamique des contrôleurs, notamment en termes de rapidité de réponse et de stabilité.

La validation des performances des contrôleurs conçus est réalisée à travers des simulations et des analyses détaillées. Ces analyses permettent de confirmer la stabilité du système et de garantir que le convertisseur maintient sa performance malgré les variations des conditions de fonctionnement et les incertitudes des paramètres.

Ce chapitre fournit un cadre méthodologique complet pour la conception et la validation de contrôleurs PI pour les convertisseurs CC-CA monophasés. Il souligne l'importance d'un contrôle précis et robuste pour assurer la qualité de l'énergie électrique, en particulier dans un paysage énergétique en constante évolution. Les techniques présentées visent à optimiser la performance des convertisseurs, qu'ils fonctionnent de manière autonome ou en synergie avec le réseau électrique.

Les sections qui suivent détailleront :

- La structure et le fonctionnement des contrôleurs PI,
- La commande vectorielle des convertisseurs en mode autonome,
- La validation des performances des contrôleurs.

Cette approche structurée permettra de développer une compréhension approfondie des principes de contrôle des convertisseurs CC-CA monophasés et de leur application dans le contexte des MRs basse tension.

4.2 Contrôleur PI

Le contrôleur proportionnel-intégral (PI) est un outil de contrôle largement utilisé dans diverses applications, notamment pour les convertisseurs CC-CA contrôlés en courant. Il est apprécié pour sa simplicité et son efficacité. Un contrôleur PI est composé de deux parties :

- **Terme proportionnel (P)** : Il réagit à l'erreur actuelle entre la valeur mesurée et la valeur désirée. Plus l'erreur est grande, plus l'action de contrôle est forte.
- **Terme intégral (I)** : Il cumule les erreurs passées, corrigeant les erreurs résiduelles qui persistent sur le long terme.

La figure 4.1 illustre la structure du contrôleur PI.

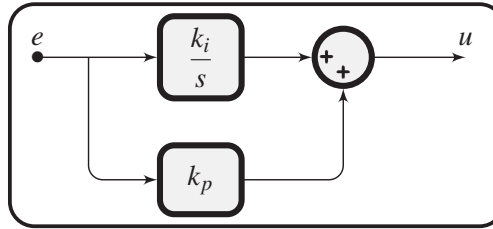


Figure 4.1 Structure du contrôleur PI

L'expression mathématique du contrôleur PI est donnée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.1)$$

Où K_p représente le gain proportionnel et K_i le gain intégral.

Le contrôleur PI est apprécié pour plusieurs raisons :

- **Simplicité de Conception et d'Implémentation** : Il ne nécessite pas de modélisation complexe du système.
- **Minimisation de l'Erreur de Régime Permanent** : Grâce à son terme intégral, le contrôleur PI corrige les erreurs résiduelles à long terme, assurant ainsi un contrôle précis.
- **Adaptabilité** : Les gains K_p et K_i peuvent être ajustés pour répondre aux besoins spécifiques du système.
- **Efficacité pour les Systèmes Linéaires** : Il fonctionne particulièrement bien pour les systèmes où la relation entre les variables est linéaire ou quasi-linéaire.

Cependant, le contrôleur PI présente également des inconvénients :

- **Erreur en Régime Permanent pour les Systèmes Non Linéaires** : Pour ces systèmes, le contrôleur PI ne peut éliminer complètement l'erreur statique en régime permanent car il est conçu pour des modèles linéaires. Face à des non-linéarités (comme la saturation, l'hystérésis ou des dynamiques complexes), l'intégrateur peut accumuler des erreurs compensatoires inappropriées, conduisant à une erreur statique résiduelle persistante même après stabilisation du système..

- **Sensibilité aux Variations des Paramètres** : Ses performances peuvent être affectées par les variations des paramètres du système, le rendant moins robuste face aux perturbations et incertitudes.
- **Risque de Dépassement et d'Oscillations** : Un mauvais réglage des gains K_p et K_i peut entraîner un dépassement important et des oscillations dans la réponse du système.

Pour accroître la robustesse et l'adaptabilité du contrôleur PI, il peut être associé à des techniques d'intelligence artificielle telles que la logique floue ou les réseaux de neurones. Par exemple, un contrôleur PI adaptatif basé sur un réseau de neurones peut ajuster ses gains en temps réel en fonction des variations des paramètres du système, offrant ainsi un contrôle plus robuste et précis Yarikkaya & Vardar (2023).

4.3 Commande vectorielle des convertisseurs CC-CA monophasé : mode autonome

La technique de commande dq appliquée aux convertisseurs CC-CA monophasés repose sur des principes similaires à ceux utilisés pour les convertisseurs triphasés. Cette technique utilise des contrôleurs PI en cascade pour optimiser les performances. La figure 4.2 illustre le schéma du contrôle pour un convertisseur CC-CA monophasé dans le référentiel dq , souvent appelée commande de contrôleur en cascade.

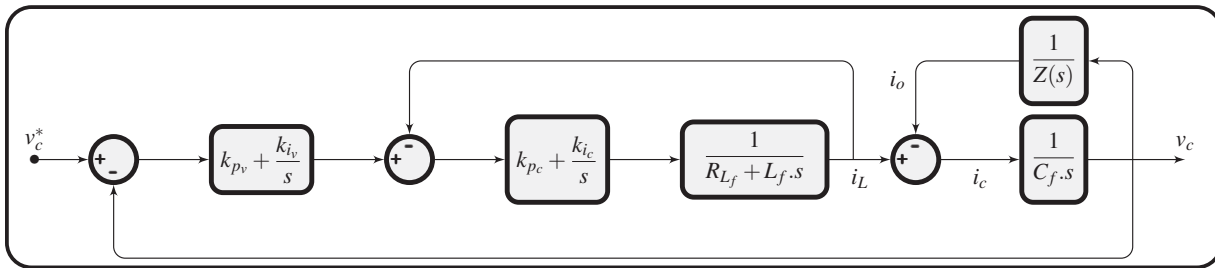


Figure 4.2 Schéma du contrôle en cascade du convertisseur CC-CA monophasé dans le référentiel dq

Comme mentionné précédemment, la commande vectorielle dq permet de simplifier le contrôle de systèmes électriques en convertissant les grandeurs électriques variables en signaux constants. Cela facilite le contrôle et améliore la précision.

4.3.1 Contrôle du courant

Le contrôle du courant est essentiel pour garantir la qualité du courant produit par le convertisseur CC-CA. Il est crucial que ce courant soit stable et sans distorsion afin de respecter les exigences de la norme IEEE 1547 concernant la distorsion harmonique totale et d'assurer une intégration conforme au réseau électrique. La figure 4.3a présente la configuration du contrôle du courant dans le référentiel dq pour un convertisseur CC-CA monophasé.

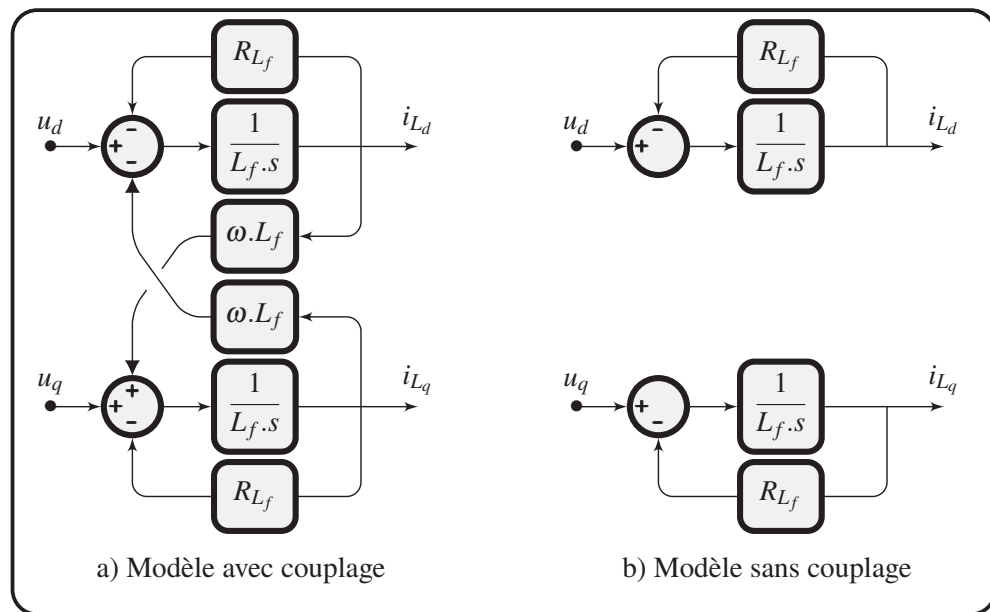


Figure 4.3 Configuration du contrôle du courant dans le référentiel dq pour un convertisseur CC-CA monophasé

Les courants dans les axes dq , notés $\{i_d, i_q\}$, sont contrôlés indirectement par la modulation des tensions correspondantes. Ces courants sont naturellement couplés, comme le montre l'équation (3.13), où une variation du courant i_q influence i_d et vice versa.

Pour résoudre ce problème de couplage, des termes de découplage sont ajoutés, comme indiqué par les équations suivantes :

$$u_d = R L_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - \underbrace{\omega L_f i_q}_{\text{Découplage}} \quad (4.2)$$

$$u_q = R L_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + \underbrace{\omega L_f i_d}_{\text{Découplage}} \quad (4.3)$$

Ces termes de découplage transforment le modèle non linéaire des tensions en un modèle linéaire, simplifiant ainsi leur contrôle avec des contrôleurs PI :

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (4.4)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \quad (4.5)$$

4.3.1.1 Structure du contrôle du courant

Le contrôle du courant repose sur une commande de rétroaction classique. La figure 4.4 présente le schéma détaillé de ce contrôle, conçu pour maintenir le courant de sortie du convertisseur CC-CA dans les limites souhaitées.

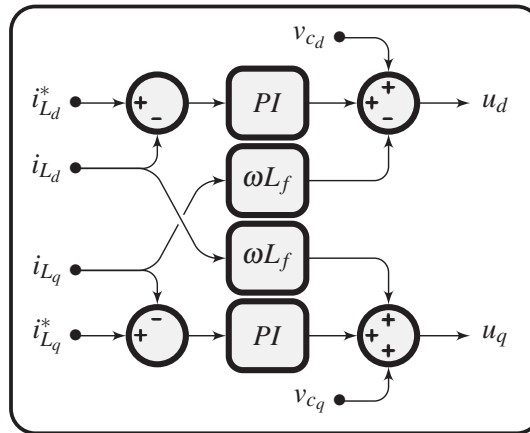


Figure 4.4 Schéma détaillé du contrôle du courant

Les équations de commande du courant sont formulées comme suit :

$$u_d = \left(k_{p_c} + \frac{k_{i_c}}{s} \right) (i_{L_d}^* - i_{L_d}) - \omega L_f i_{L_q} + v_{c_d} \quad (4.6)$$

$$u_q = \left(k_{p_c} + \frac{k_{i_c}}{s} \right) (i_{L_q}^* - i_{L_q}) + \omega L_f i_{L_d} + v_{c_q} \quad (4.7)$$

Où :

- u_d et u_q représentent les tensions de modulation pour les axes d et q .
- k_{p_c} et k_{i_c} sont les gains du contrôleur PI.
- $i_{L_d}^*$ et $i_{L_q}^*$ désignent les courants de référence pour les axes d et q .
- i_{L_d} et i_{L_q} correspondent aux courants mesurés pour les axes d et q .
- $\omega L_f i_{L_d}$ et $\omega L_f i_{L_q}$ sont les termes de découplage des axes dq .

Cette structure permet de maintenir un contrôle précis du courant, assurant ainsi la qualité du signal de sortie du convertisseur.

4.3.1.2 Conception du contrôleur PI pour le contrôle du courant

La fonction de transfert de la boucle de contrôle du courant est définie par l'équation (4.8), comme illustrée à la figure 4.5 :

$$H_c = \frac{1}{L_f s + R_{L_f}} \quad (4.8)$$

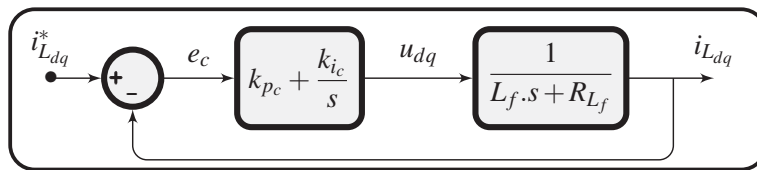


Figure 4.5 Schéma détaillé du contrôle du courant

Pour concevoir le contrôleur de courant de la boucle interne, il est essentiel de viser une réponse dynamique rapide avec un dépassement minimal lors des changements de consigne. Le contrôleur

doit assurer une précision et une stabilité du courant, éliminer toute erreur en régime permanent et demeurer robuste face aux variations des paramètres du système.

La fonction de transfert du contrôleur PI est donnée par l'équation (4.9) :

$$C_c(s) = k_{p_c} + \frac{k_{i_c}}{s} \quad (4.9)$$

Le contrôleur de courant PI compare le courant $i_{L_{dq}}$ à la valeur de référence fournie par le contrôleur de tension, générant ainsi un signal de tension de référence pour le module MLI. La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de ce contrôle est exprimée comme suit :

$$FTBO_c(s) = H_c(s) \cdot C_c(s) \quad (4.10)$$

En substituant les expressions de $H_c(s)$ et $C_c(s)$ par leurs valeurs respectives dans l'équation (4.6), et en substituant l'équation (4.9) dans l'équation (4.10), on obtient :

$$FTBO_c(s) = \frac{k_{i_c}}{R_{L_f}s} \left(1 + \frac{k_{p_c}}{k_{i_c}}s \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{L_f}{R_{L_f}}s} \right) \quad (4.11)$$

Après compensation du pôle dominant du contrôle du courant avec le contrôleur PI, l'équation (4.10) prend la forme suivante :

$$FTBO_c(s) = \frac{k_{i_c}}{s} \quad (4.12)$$

avec :

$$\frac{L_f}{R_{L_f}} = \frac{k_{p_c}}{k_{i_c}} \quad (4.13)$$

L'expression pour la FTBF du contrôle du courant est donnée par l'équation (4.14) :

$$FTBF_c(s) = \frac{FTBO_c(s)}{1 + FTBO_c(s)} = \frac{1}{1 + \frac{R_{L_f}}{k_{i_c}}s} \quad (4.14)$$

Étant donné qu'il s'agit d'un système du premier ordre, il peut être écrit sous la forme de l'équation (4.15), où τ_c est la constante de temps et T_{r_c} est le temps de réponse en boucle fermée.

La $FTBF_c(s)$ est représentée comme un système du premier ordre :

$$FTBF_c(s) = \frac{1}{1 + \tau_c s} \quad (4.15)$$

On suppose que $T_{r_c} = 3\tau_c$.

$$\frac{R_{L_f}}{k_{i_c}} = \tau_c = \frac{T_{r_c}}{3} \quad (4.16)$$

En résolvant pour τ_c en utilisant l'équation (4.16), les gains proportionnel et intégral pour le contrôle du courant, k_{p_c} et k_{i_c} , sont obtenus, comme indiqué dans l'équation (4.17) :

$$\begin{cases} k_{i_c} = \frac{3R_{L_f}}{T_{r_c}} \\ k_{p_c} = \frac{3L_f}{T_{r_c}} \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.2 Contrôle de la tension

Dans les MRs intégrant des sources d'énergie renouvelable à basse tension, un contrôle efficace de la tension est essentiel pour maintenir une qualité optimale de l'énergie. La commande de la tension externe est fréquemment mise en œuvre à l'aide d'un contrôle par rétroaction anticipative, souvent via un contrôleur PI. La figure 4.6a présente la configuration du contrôle de la tension dans le référentiel dq pour un convertisseur CC-CA monophasé.

Les tensions dans les axes dq , notées $\{v_d, v_q\}$, sont contrôlées indirectement par la modulation des courants associés. Ces tensions sont intrinsèquement couplées, comme indiqué par l'équation (3.16), où une variation du courant i_q affecte v_d et vice versa.

Pour éliminer ce couplage, des termes de découplage sont ajoutés dans chaque axe, comme illustré par les équations suivantes :

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \underbrace{P\omega_m L_q i_q}_{\text{Découplage}} \quad (4.18)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \underbrace{P\omega_m (L_d i_d + \lambda_f)}_{\text{Découplage}} \quad (4.19)$$

Ces termes de découplage transforment le modèle non linéaire des tensions en un modèle linéaire, simplifiant ainsi son contrôle avec des contrôleurs PI :

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (4.20)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \quad (4.21)$$

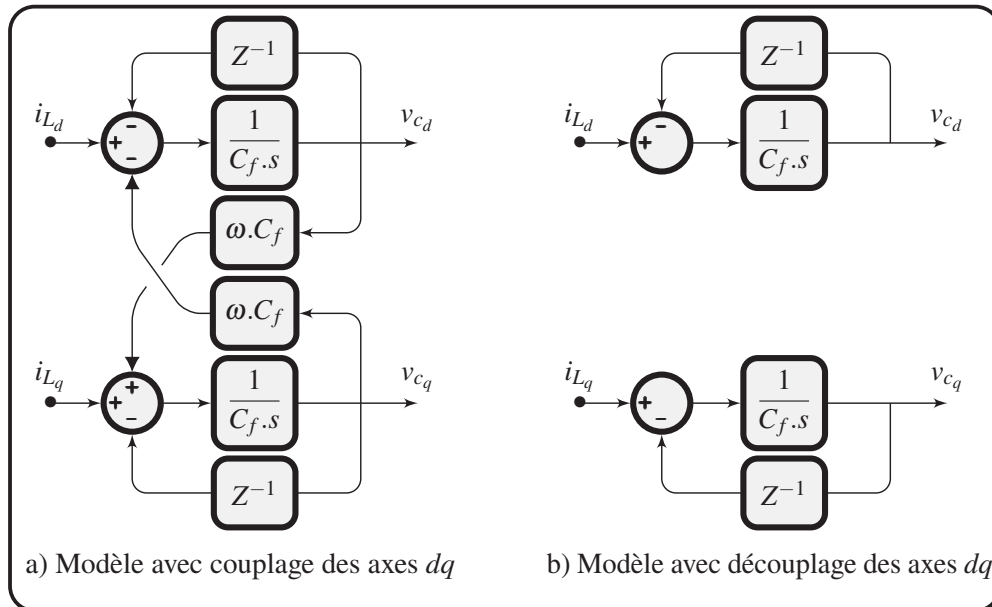


Figure 4.6 Configuration générale du contrôle de la tension pour un convertisseur CC-CA

4.3.2.1 Structure du contrôle de la tension

Le contrôle de la tension repose sur une commande de rétroaction classique. La figure 4.7 montre le schéma détaillé de ce contrôle, visant à maintenir la tension de sortie du convertisseur dans les limites souhaitées.

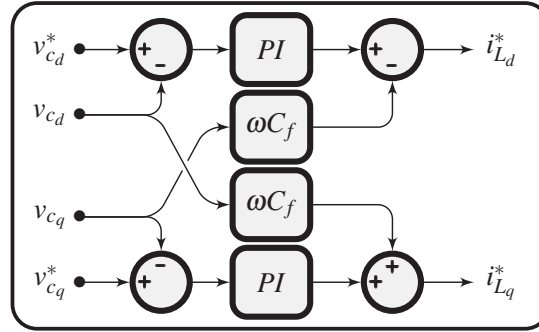


Figure 4.7 Schéma détaillé du contrôle de la tension

Les équations de commande de la tension sont formulées comme suit :

$$i_{Ld}^* = \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) (v_{cd}^* - v_{cd}) - \omega C_f v_{cq} \quad (4.22)$$

$$i_{Lq}^* = \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) (v_{cq}^* - v_{cq}) + \omega C_f v_{cd} \quad (4.23)$$

où :

- i_{Ld}^* et i_{Lq}^* représentent les courants de référence pour les axes d et q .
- k_{pv} et k_{iv} sont les gains du contrôleur PI.
- v_{cd}^* et v_{cq}^* désignent les tensions de référence pour les axes d et q .
- v_{cd} et v_{cq} correspondent aux tensions mesurées pour les axes d et q .
- $\omega C_f v_{cd}$ et $\omega C_f v_{cq}$ sont les termes de découplage des axes dq .

Cette structure permet de maintenir un contrôle précis de la tension, assurant ainsi la qualité du signal de sortie du convertisseur.

4.3.2.2 Conception du contrôleur PI pour le contrôle de la tension

La conception du contrôleur PI pour le contrôle de la tension suit une démarche similaire à celle du contrôle du courant. La fonction de transfert du contrôle de la tension est décrite par l'équation (4.24) :

$$H_v = \frac{1}{C_f s} \quad (4.24)$$

La fonction de transfert du contrôleur PI de tension est donnée par l'équation (4.25) :

$$C_v(s) = k_{p_v} + \frac{k_{i_v}}{s} \quad (4.25)$$

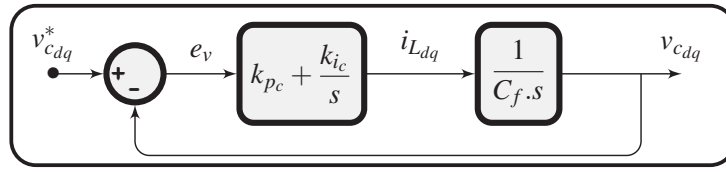


Figure 4.8 Schéma détaillé du contrôle de la tension

Le contrôle de la tension utilise un contrôleur PI pour comparer la tension v_{cdq} avec la valeur de référence fournie par le contrôleur de puissance ANN et générer la référence de courant de découplage. La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de ce contrôle est exprimée comme suit :

$$FTBO_v(s) = H_v(s) \cdot C_v(s) \quad (4.26)$$

En substituant les expressions de $H_v(s)$ et $C_v(s)$ avec leurs valeurs respectives dans l'équation (4.24), et en substituant l'équation (4.25) dans l'équation (4.26), on obtient :

$$FTBO_v(s) = \frac{1}{C_f s} \left(k_{p_v} + \frac{k_{i_v}}{s} \right) \quad (4.27)$$

4.4 Commande vectorielle des convertisseurs CC-CA monophasés : mode connecté au réseau

La gestion des convertisseurs CC-CA en mode connecté au réseau présente des défis supplémentaires par rapport au mode autonome. En plus de réguler les courants et les tensions internes, le contrôleur doit également gérer l'interaction avec le réseau électrique. Cette synchronisation est essentielle pour maintenir la stabilité du réseau et assurer une alimentation électrique fiable. Cette section décrit la conception des contrôleurs pour un convertisseur CC-CA monophasé fonctionnant en mode connecté au réseau, en utilisant la commande vectorielle dans le référentiel rotatif dq . La figure 4.9 illustre le schéma du contrôle pour un convertisseur CC-CA monophasé dans le référentiel dq .

4.4.1 principes de base du contrôle connecté au réseau

En mode connecté au réseau, les convertisseurs CC-CA doivent assurer une interaction harmonieuse avec le réseau électrique, en plus de respecter les standards comme la norme IEEE1547. Cela inclut non seulement la conversion efficace de l'énergie, mais également la synchronisation avec les paramètres du réseau, tels que la fréquence et la phase.

Les principaux objectifs de ce contrôle sont les suivants :

- **Synchronisation avec le réseau électrique :** Assurer que la fréquence et la phase de la sortie du convertisseur soient alignées avec celles du réseau.
- **Contrôle de la puissance active et réactive :** Gérer efficacement les flux de puissance active (P) et réactive (Q) entre le convertisseur et le réseau.
- **Qualité de l'énergie fournie :** Minimiser le TDH pour garantir une énergie de haute qualité.

Ces points sont détaillés dans les sections suivantes.

4.4.1.1 Synchronisation avec le réseau électrique

La synchronisation est cruciale pour éviter les déséquilibres et les perturbations qui pourraient affecter la stabilité du réseau. Elle permet également d'assurer un contrôle précis des courants actifs et réactifs injectés dans le réseau électrique. Elle est réalisée en utilisant une boucle à verrouillage de phase (PLL), qui ajuste en continu la fréquence et la phase interne du convertisseur pour les aligner avec celles du réseau. Cette synchronisation permet également de minimiser l'écart de phase entre la sortie du convertisseur et le réseau, réduisant ainsi les oscillations et les fluctuations.

4.4.1.2 Contrôle de la puissance active et réactive

La puissance active (P) est celle qui effectue un travail utile, comme l'alimentation des appareils électriques, tandis que la puissance réactive (Q) est associée aux champs magnétiques et capacitifs dans le réseau. En mode connecté au réseau, la puissance réactive joue un rôle crucial dans la régulation de la tension du réseau, conformément aux exigences de la norme IEEE 1547. Cette régulation de tension par la puissance réactive permet d'assurer la stabilité du réseau électrique et de maintenir la qualité de l'alimentation, tout en évitant des flux de puissance inappropriés qui pourraient surcharger les lignes de transmission.

Le contrôle de la puissance active et réactive est réalisé à travers des contrôleurs de courant dans le référentiel dq . Ces contrôleurs ajustent les courants i_d et i_q pour suivre les références i_d^* et i_q^* , respectivement. Pour le transfert de puissance active seulement, la référence i_q^* est maintenue à zéro.

4.4.1.3 Qualité de l'énergie fournie

La qualité de l'énergie fournie par le convertisseur est essentielle pour le bon fonctionnement des appareils connectés au réseau. Cela inclut la minimisation du TDH, qui peut provoquer des échauffements et des dysfonctionnements des équipements. Le contrôle du TDH est également un requis de la norme IEEE1547. Le contrôle précis des courants i_d et i_q permet de réduire le

TDH en assurant que les courants de sortie suivent de près leurs références, sans fluctuations ou oscillations indésirables.

4.4.2 Contrôle du courant

En mode connecté au réseau, le contrôle du courant est conçu de manière similaire à celui utilisé en mode autonome, mais avec des ajustements pour s'assurer que les courants injectés respectent les références imposées par le réseau. L'objectif est de réguler les courants dans les axes dq pour suivre les valeurs de référence, garantissant ainsi une injection précise de la puissance active dans le réseau.

4.4.2.1 Structure du contrôle du courant

La structure du contrôle du courant pour un convertisseur CC-CA en mode connecté au réseau est similaire à celle utilisée en mode autonome. Cependant, en mode connecté, le courant i_q est maintenu à zéro pour garantir que seule la puissance active est injectée dans le réseau.

La figure 4.10 présente le schéma du contrôle du courant pour ce mode de fonctionnement. Les

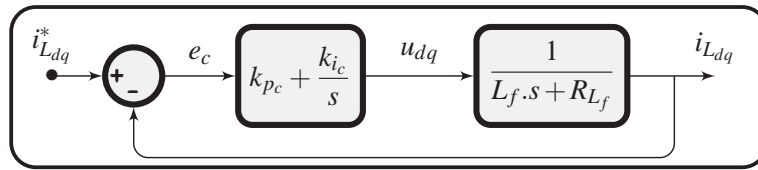


Figure 4.10 Schéma détaillé du contrôle du courant pour le mode connecté

équations de commande du courant en mode connecté sont données par :

$$u_d = \left(k_{pc} + \frac{k_{ic}}{s} \right) (i_{Ld}^* - i_{Ld}) - \omega L_f i_{Lq} + v_{cd} \quad (4.30)$$

$$u_q = \left(k_{pc} + \frac{k_{ic}}{s} \right) (i_{Lq}^* - i_{Lq}) + \omega L_f i_{Ld} + v_{cq} \quad (4.31)$$

où :

- u_d et u_q représentent les tensions de modulation pour les axes d et q .
- k_{p_c} et k_{i_c} sont les gains du contrôleur PI.
- $i_{L_d}^*$ et $i_{L_q}^*$ désignent les courants de référence pour les axes d et q . En mode connecté, $i_{L_q}^*$ est maintenu à zéro.
- i_{L_d} et i_{L_q} correspondent aux courants mesurés pour les axes d et q .
- $\omega L_f i_{L_d}$ et $\omega L_f i_{L_q}$ sont les termes de découplage des axes dq .

Cette configuration assure que le courant i_d suit précisément la référence i_d^* , correspondant à la puissance active injectée dans le réseau, tandis que le courant i_q est maintenu à zéro pour éviter l'injection de puissance réactive.

4.4.2.2 Conception du contrôleur PI pour le contrôle du courant

La conception du contrôleur PI pour le contrôle du courant en mode connecté suit une démarche similaire à celle du mode autonome. La fonction de transfert du contrôle du courant est décrite par l'équation (4.32), comme illustrée dans la figure 4.10 :

$$H_c = \frac{1}{L_f s + R_{L_f}} \quad (4.32)$$

La fonction de transfert du contrôleur PI est donnée par l'équation (4.33) :

$$C_c(s) = k_{p_c} + \frac{k_{i_c}}{s} \quad (4.33)$$

Le contrôle du courant utilise un contrôleur PI pour comparer le courant $i_{L_{dq}}$ à la valeur de référence fournie par le contrôleur de tension, générant ainsi un signal de tension de référence pour le module MLI. La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est exprimée comme suit :

$$FTBO_c(s) = H_c(s) \cdot C_c(s) \quad (4.34)$$

En substituant les expressions de $H_c(s)$ et $C_c(s)$ avec leurs valeurs respectives dans l'équation (4.30), et en substituant l'équation (4.33), il est obtenu :

$$FTBO_c(s) = \frac{k_{i_c}}{R_{L_f}s} \left(1 + \frac{k_{p_c}}{k_{i_c}}s \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{L_f}{R_{L_f}}s} \right) \quad (4.35)$$

Après compensation du pôle dominant du contrôle du courant avec le contrôleur PI, l'équation (4.34) prend la forme suivante :

$$FTBO_c(s) = \frac{k_{i_c}}{s} \quad (4.36)$$

avec :

$$\frac{L_f}{R_{L_f}} = \frac{k_{p_c}}{k_{i_c}} \quad (4.37)$$

L'expression pour la FTBF du contrôle du courant est donnée par l'équation (4.38) :

$$FTBF_c(s) = \frac{FTBO_c(s)}{1 + FTBO_c(s)} = \frac{1}{1 + \frac{R_{L_f}}{k_{i_c}}s} \quad (4.38)$$

Étant donné qu'il s'agit d'un système du premier ordre, il peut être écrit sous la forme de l'équation (4.39), où τ_c est la constante de temps et T_{r_c} est le temps de réponse en boucle fermée.

Le $FTBF_c(s)$ se comporte comme un système du premier ordre :

$$FTBF_c(s) = \frac{1}{1 + \tau_c s} \quad (4.39)$$

On suppose que $T_{r_c} = 3\tau_c$.

$$\frac{R_{L_f}}{k_{i_c}} = \tau_c = \frac{T_{r_c}}{3} \quad (4.40)$$

En résolvant pour τ_c en utilisant l'équation (4.40), les gains proportionnel et intégral pour le contrôleur de courant, k_{p_c} et k_{i_c} , sont obtenus, comme indiqué dans l'équation (4.41) :

$$\begin{cases} k_{i_c} = \frac{3R_{L_f}}{T_{r_c}} \\ k_{p_c} = \frac{3L_f}{T_{r_c}} \end{cases} \quad (4.41)$$

4.4.3 Synchronisation avec le réseau

La synchronisation avec le réseau est une étape cruciale pour assurer une connexion stable et fiable du convertisseur CC-CA au réseau électrique. Cette synchronisation implique l'alignement de la fréquence, de la phase et de l'amplitude de la tension de sortie du convertisseur avec celles du réseau.

4.4.3.1 Importance de la synchronisation

Une synchronisation précise est essentielle pour éviter les perturbations et les distorsions lors de la connexion au réseau. Elle garantit que le convertisseur injecte de l'énergie dans le réseau de manière harmonieuse, sans provoquer de fluctuations de puissance. En cas de défaillance de la synchronisation, des problèmes tels que des oscillations indésirables, une mauvaise qualité de l'énergie et des pertes accrues peuvent survenir. Il convient également de souligner que l'onduleur sera déconnecté du réseau lors de ces événements, ce qui entraînera une réduction impulsive de la puissance active sur le réseau et contribuera ainsi aux perturbations du système électrique.

4.4.3.2 Techniques de synchronisation

Plusieurs techniques de synchronisation sont disponibles pour les convertisseurs CC-CA, parmi lesquelles :

- **Boucle à Verrouillage de Phase (PLL) :** La PLL est une technique couramment utilisée pour la synchronisation au réseau. Elle consiste à ajuster continuellement la phase de la tension de sortie du convertisseur pour qu'elle suive celle du réseau. La figure 4.11 montre la structure d'une boucle à verrouillage de phase typique.
- **Synchronisation par Filtrage Harmonique :** Cette technique utilise des filtres harmoniques pour extraire les composantes fondamentales de la tension du réseau, permettant ainsi une synchronisation précise. Bien que cette technique soit efficace pour éliminer les harmoniques, elle peut être complexe à mettre en œuvre.
- **Synchronisation via Transformée de Park :** La transformée de Park est utilisée pour convertir les signaux triphasés en composants directs et quadratures (dq). En synchronisant les composants dq avec ceux du réseau, une synchronisation précise peut être obtenue.

4.4.3.3 Implémentation de la PLL pour la synchronisation

La boucle à verrouillage de phase (PLL) est largement privilégiée en raison de sa simplicité et de son efficacité. La structure d'une PLL typique comprend un détecteur de phase, un filtre passe-bas et un oscillateur contrôlé en tension (VCO).

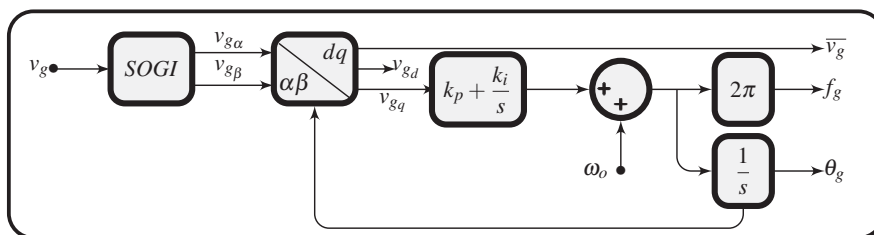


Figure 4.11 Structure typique d'une boucle à verrouillage de phase (PLL)

Ces éléments se décrivent comme suit :

- **Détecteur de Phase** : Cet élément compare la phase de la tension de sortie du convertisseur avec celle du réseau et génère un signal d'erreur proportionnel à la différence de phase.
- **Filtre Passe-Bas** : Ce filtre lisse le signal d'erreur pour éliminer les composantes haute fréquence indésirables, produisant un signal de correction de phase propre.
- **Oscillateur Contrôlé en Tension (VCO)** : Le VCO ajuste la fréquence de la tension de sortie du convertisseur en fonction du signal de correction, alignant ainsi la phase avec celle du réseau.

La boucle de synchronisation fonctionne selon les équations suivantes :

$$\theta_{error} = \theta_{grid} - \theta_{conv} \quad (4.42)$$

$$v_{control} = K_p \theta_{error} + K_i \int \theta_{error} dt \quad (4.43)$$

$$\omega_{conv} = \omega_{nom} + v_{control} \quad (4.44)$$

Où :

- θ_{error} est l'erreur de phase entre le réseau et le convertisseur.
- θ_{grid} et θ_{conv} sont respectivement les phases du réseau et du convertisseur.
- $v_{control}$ est le signal de contrôle ajustant la fréquence du convertisseur.
- K_p et K_i sont les gains proportionnel et intégral de la PLL.
- ω_{conv} est la fréquence de sortie ajustée du convertisseur.
- ω_{nom} est la fréquence nominale du réseau.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthodologie complète pour la conception de contrôleurs proportionnel-intégral destinés aux convertisseurs CC-CA monophasés fonctionnant dans le référentiel rotatif. L'approche développée couvre de manière exhaustive les deux modes de fonctionnement essentiels : le mode autonome et le mode connecté au réseau électrique.

La commande vectorielle dans le référentiel dq s'est révélée particulièrement efficace pour simplifier le contrôle des systèmes monophasés en transformant les grandeurs variables en signaux constants. Les techniques de découplage présentées permettent de traiter indépendamment les composantes directe et en quadrature, facilitant ainsi la conception des contrôleurs PI en cascade. La synchronisation précise avec le réseau électrique, réalisée par les boucles à verrouillage de phase, garantit une intégration harmonieuse tout en respectant les exigences normatives de la IEEE 1547.

Les contrôleurs PI développés démontrent des performances satisfaisantes en termes de stabilité, de précision et de robustesse pour les applications conventionnelles des MRs basse tension. L'analyse fréquentielle et temporelle confirme la capacité de ces contrôleurs à maintenir la qualité de l'énergie électrique et à assurer un contrôle précis des flux de puissance active et réactive.

Cependant, les défis croissants des systèmes énergétiques modernes révèlent certaines limitations des approches de contrôle classiques. Les contrôleurs PI, bien qu'efficaces pour les systèmes linéaires, présentent des difficultés face aux non-linéarités complexes et aux variations paramétriques importantes caractéristiques des MRs contemporains. La sensibilité aux perturbations, les erreurs en régime permanent pour les systèmes non linéaires, et la nécessité d'un réglage manuel des paramètres constituent autant d'obstacles à l'optimisation des performances.

L'évolution vers des réseaux électriques intelligents et la multiplication des sources d'énergie renouvelable intermittentes exigent des techniques de contrôle plus sophistiquées et adaptatives. Les méthodes conventionnelles atteignent leurs limites lorsqu'il s'agit de gérer simultanément l'optimisation multi-objectifs, l'adaptation en temps réel aux conditions variables, et l'apprentissage à partir des données historiques de fonctionnement.

Dans ce contexte, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle représente une voie prometteuse pour surmonter ces limitations. Les réseaux de neurones artificiels offrent une capacité d'apprentissage et d'adaptation remarquable, permettant de modéliser des relations

complexes et non linéaires. L'optimisation par essaim de particules, quant à elle, fournit des mécanismes efficaces pour la recherche de solutions optimales dans des espaces multidimensionnels complexes.

Le chapitre suivant explorera ces techniques avancées, en détaillant les fondements théoriques des réseaux de neurones artificiels et de l'optimisation par essaim de particules. Cette exploration établira les bases nécessaires pour développer une approche hybride innovante, combinant l'efficacité des contrôleurs classiques avec la flexibilité et l'adaptabilité des techniques d'intelligence artificielle, ouvrant ainsi la voie vers des systèmes de contrôle de nouvelle génération pour les convertisseurs de puissance des MRs.

CHAPITRE 5

RÉSEAUX DE NEURONES ET OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES

5.1 Introduction

Ce chapitre explore deux techniques avancées et complémentaires dans le domaine de l'intelligence artificielle et de l'optimisation : les RNA et l'OEP. Les réseaux de neurones, inspirés par le fonctionnement du cerveau humain, sont des modèles computationnels capables de reconnaître des motifs complexes et d'apprendre à partir de données. Ils sont largement utilisés dans diverses applications, telles que la reconnaissance d'images et la prédiction de séries temporelles.

D'autre part, l'OEP inspire des comportements collectifs des systèmes biologiques tels que les essaims d'oiseaux et les bancs de poissons. L'OEP est utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes en explorant l'espace de solutions de manière collaborative et distribuée.

L'intégration des réseaux de neurones et de OEP offre des avantages significatifs en combinant les capacités d'apprentissage des motifs complexes des premiers avec les puissantes capacités d'optimisation des seconds. Par exemple, cette combinaison peut être utilisée pour optimiser les paramètres des réseaux de neurones, améliorant ainsi leur performance dans diverses applications.

Ce chapitre fournit une base solide pour comprendre comment ces deux techniques peuvent être utilisées ensemble pour résoudre des problèmes complexes et optimiser les systèmes dans divers contextes. Ces techniques seront intégrées dans le chapitre suivant pour élaborer une technique de contrôle de statistique basée sur les réseaux de neurones artificiels et l'optimisation par essaim de particules.

Il est à noter que les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication scientifique Belgana & Fortin-Blanchette (2024), attestant de la validité et de la pertinence de l'approche développée.

5.2 Réseau de neurones artificiels

Un RNA est un modèle mathématique inspiré par la structure et les fonctions des réseaux neuronaux biologiques. Cette technologie constitue une alternative puissante aux méthodes statistiques traditionnelles pour résoudre des problèmes complexes de classification, de prédiction et de reconnaissance de formes.

Des études comparatives démontrent que la précision des techniques RNA surpasse souvent celle des approches statistiques classiques, particulièrement pour modéliser des relations non linéaires complexes dans les données. Cette supériorité s'explique par la capacité des RNA à capturer des interactions subtiles entre variables que les méthodes linéaires traditionnelles ne peuvent pas détecter.

Les RNA appartiennent à la famille des techniques d'apprentissage automatique (machine learning). L'apprentissage automatique se définit comme l'utilisation d'algorithmes capables d'apprendre automatiquement à partir des données grâce à des techniques mathématiques sophistiquées.

Les RNA fonctionnent en optimisant de multiples paramètres internes pour ajuster les données d'entrée à la sortie désirée. Ce processus d'optimisation est souvent perçu comme une "boîte noire" car les mécanismes internes peuvent être complexes et difficiles à interpréter directement.

Parmi les autres algorithmes d'apprentissage automatique remarquables, on trouve les arbres de décision (decision trees), les forêts aléatoires (random forests), les machines à vecteurs de support (support vector machines) et l'algorithme des k-plus proches voisins (k-nearest neighbors).

5.2.1 Le neurone artificiel

Les animaux ont des cerveaux complexes composés de milliards de neurones ; chez les humains, le cerveau contient environ 10^{11} neurones, chacun ayant environ 10^4 synapses ou connexions. Un neurone biologique est une cellule hautement spécialisée avec trois régions principales : un corps cellulaire (soma), des dendrites, et un axone.

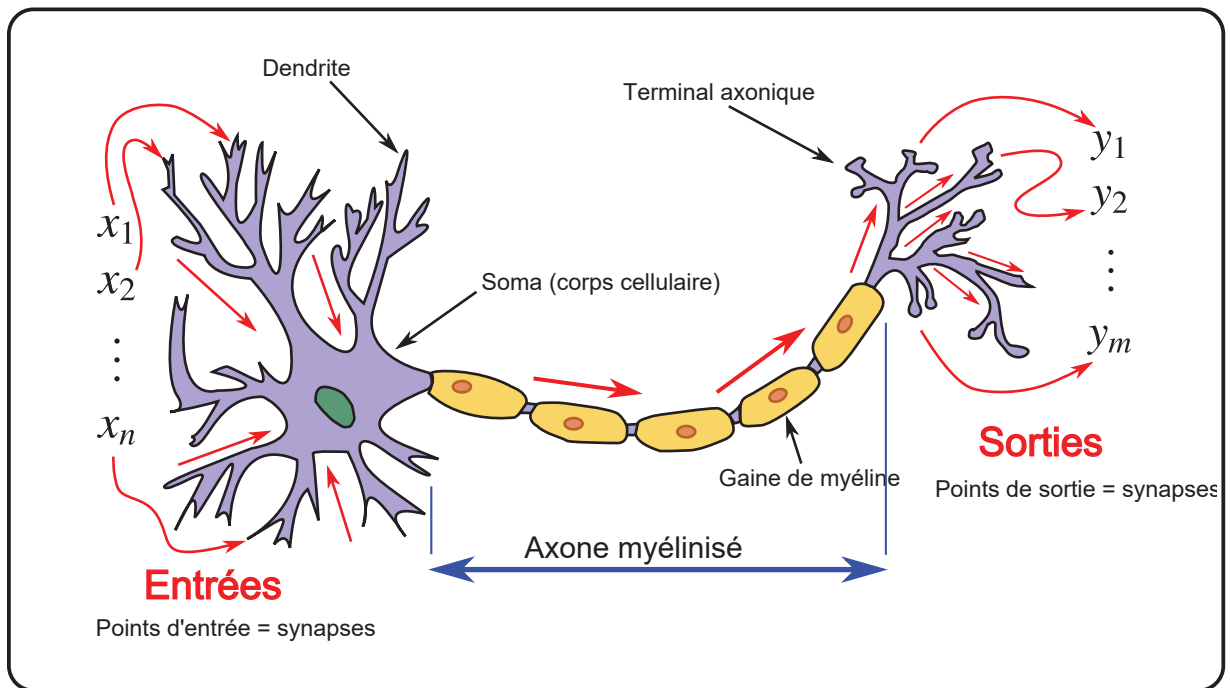


Figure 5.1 Schéma d'une cellule neuronale biologique

Un neurone artificiel est un modèle mathématique simple inspiré de son homologue biologique. Les neurones artificiels produisent une valeur de sortie en deux étapes : d'abord, le neurone calcule une somme pondérée de ses signaux d'entrée, puis applique une fonction d'activation à cette somme pour obtenir la sortie.

En 1943, McCulloch et Pitts McCulloch & Pitts (1943) ont proposé le premier modèle de neurone artificiel, connu sous le nom de perceptron, avec une fonction d'activation à seuil binaire. Ce neurone calcule une somme pondérée de ses signaux d'entrée et génère une sortie de "1" si cette somme dépasse un certain seuil, sinon la fonction renvoie "0".

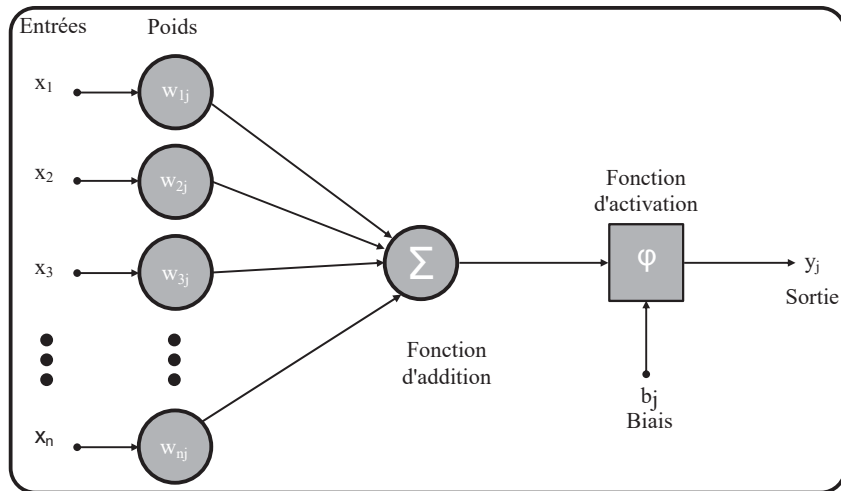


Figure 5.2 Neurone artificiel de McCulloch et Pitts

Le perceptron applique une combinaison linéaire de ses entrées, obtenant un signal sur lequel une fonction d'activation est appliquée pour obtenir le signal de sortie. Les fonctions non linéaires sont souvent utilisées pour donner au perceptron un comportement non linéaire. Le modèle mathématique du perceptron est présenté dans l'Éq. 5.1 :

$$\hat{y} = \sigma \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + \text{biais} \right) \quad (5.1)$$

Où $\hat{y}$ est la sortie du neurone ; σ est la fonction d'activation ; x est le vecteur d'entrée de n éléments ; w est le vecteur de poids et *biais* est une valeur qui permet de décaler la fonction d'activation. Le biais est similaire à la constante b d'une fonction linéaire $y = ax + b$.

5.2.2 Le Réseau de neurones artificiels

Le perceptron en lui-même n'a pas beaucoup de puissance de traitement, surtout lorsqu'il est comparé à un RNA qui est composé de plusieurs couches de perceptrons. Un RNA peut être défini comme un ensemble fortement connecté de neurones interconnectés les uns avec les autres. Un modèle largement utilisé appelé perceptron multicouche (PMC) est le type de RNA le plus courant. Le PMC se compose d'une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées,

et d'une couche de sortie. Chaque couche contient plusieurs neurones, et chaque neurone dans une couche est connecté aux neurones de la couche adjacente avec des poids différents, qui déterminent dans quelle mesure une unité affectera l'autre.

Les réseaux neuronaux sont généralement représentés par un diagramme de réseau composé de nœuds connectés par des liens dirigés. Les nœuds sont disposés en couches, et la structure du réseau neuronal le plus utilisé se compose de trois couches : une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie de nœuds. Les signaux pénètrent dans la couche d'entrée, passent par les couches cachées et arrivent à la couche de sortie dans un chemin unidirectionnel dans le PMC.

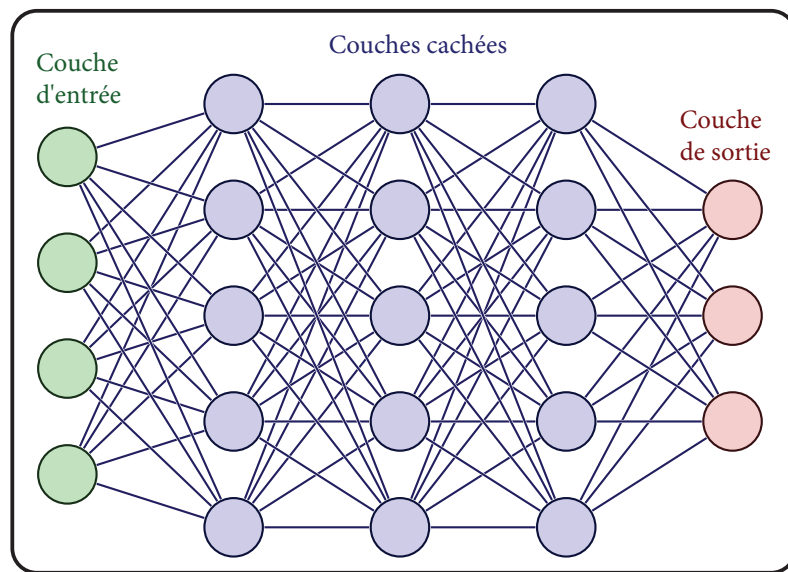


Figure 5.3 Schéma d'un RNA

Le RNA constitue un modèle capable de réaliser des cartographies non linéaires complexes entre les données d'entrée et les sorties désirées, dépassant ainsi les limitations des modèles linéaires traditionnels pour résoudre des problèmes de classification et de régression sophistiqués.

5.2.2.1 Structure des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont composés de couches de neurones artificiels, où chaque couche effectue une transformation spécifique des données d'entrée. Les principales structures de réseaux de neurones incluent :

5.2.2.1.1 Couches d'entrée et de sortie

La couche d'entrée est la première couche du réseau, où les données brutes sont introduites. Le nombre de neurones dans cette couche correspond au nombre de caractéristiques des données d'entrée.

La couche de sortie est la dernière couche du réseau, où les résultats finaux sont produits. Le nombre de neurones dans cette couche dépend du type de problème : un seul neurone pour une régression ou une classification binaire, plusieurs neurones pour une classification multi-classes.

5.2.2.1.2 Couches cachées

Entre les couches d'entrée et de sortie se trouvent une ou plusieurs couches cachées. Ces couches jouent un rôle crucial en permettant au réseau d'apprendre des représentations complexes des données. Chaque neurone d'une couche cachée reçoit les sorties des neurones de la couche précédente, effectue une transformation, et passe le résultat aux neurones de la couche suivante.

5.2.2.1.3 Connexion et propagation

Les réseaux de neurones peuvent être connectés de différentes manières, définissant ainsi plusieurs types de réseaux. Dans un réseau de neurones feedforward, les connexions entre neurones vont dans une seule direction, des entrées vers les sorties, sans boucles. Dans les réseaux de neurones récurrents, il existe des connexions rétroactives permettant aux neurones de recevoir des signaux de leurs propres sorties ou des sorties de neurones de couches ultérieures.

5.2.2.2 Fonctions d'activation

Les fonctions d'activation représentent un élément crucial des réseaux de neurones car elles introduisent la non-linéarité nécessaire pour modéliser des relations complexes. Sans ces fonctions, même un réseau multicouche ne pourrait réaliser que des transformations linéaires.

Rôle des fonctions d'activation : Ces fonctions déterminent si un neurone doit être activé en transformant la somme pondérée des entrées en une sortie dans une plage spécifique. Elles permettent au réseau de capturer des patterns et des relations non linéaires dans les données.

Les fonctions les plus couramment utilisées présentent une forme caractéristique en courbe lisse, comme la fonction sigmoïde et la tangente hyperbolique. Ces fonctions offrent une transition graduelle entre leurs valeurs minimales et maximales, ce qui facilite l'apprentissage par le réseau.

5.2.2.2.1 Fonction hardlim

La fonction hardlim, également connue sous le nom de fonction de seuil binaire, a été la première fonction d'activation présentée par McCulloch et Pitts. Elle donne des valeurs de sortie binaires, "0" ou "1" : "0" lorsque la valeur du signal est inférieure à "0" et "1" lorsque la valeur du signal est égale ou supérieure à "0".

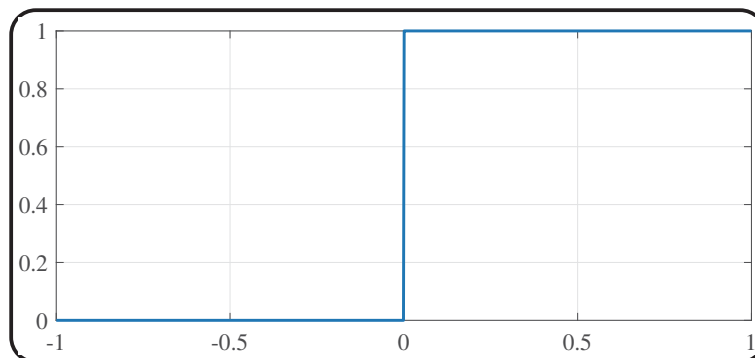


Figure 5.4 Tracé de la fonction d'activation hardlim

La formule est présentée dans l'Éq. 5.2.

$$f(x) = \text{hardlim}(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < 0 \\ 1 & \text{pour } x \geq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

La fonction hardlim est rarement utilisée aujourd'hui, car elle ne capture pas les relations non linéaires présentes dans la plupart des problèmes modernes. Elle a été dépassée par des fonctions plus flexibles comme la fonction Sigmoidé.

5.2.2.2.2 Fonction sigmoïde

La fonction sigmoïde demeure largement utilisée pour plusieurs raisons importantes :

- **Sortie bornée** : Elle produit des valeurs strictement comprises entre 0 et 1
- **Dérivabilité** : Sa dérivée existe partout, ce qui facilite l'algorithme d'apprentissage
- **Interprétation probabiliste** : Les sorties peuvent être interprétées comme des probabilités
- **Transition douce** : Elle évite les changements brusques dans les calculs

La formule mathématique de la fonction sigmoïde s'exprime comme suit :

$$f(x) = \text{sigmoïde}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.3)$$

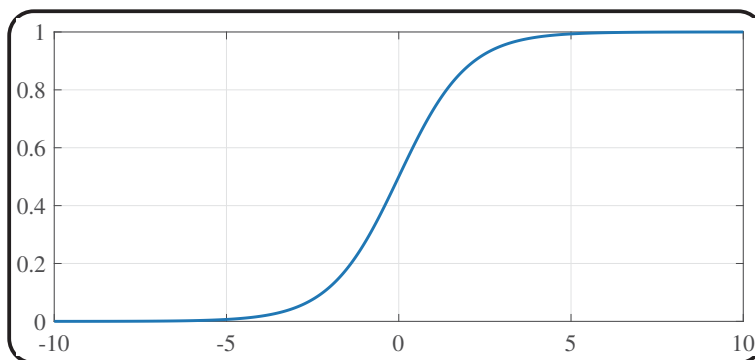


Figure 5.5 Tracé de la fonction d'activation sigmoïde

Les réseaux utilisant des fonctions sigmoïdes ont été appliqués à de nombreux problèmes tels que l'inférence de la qualité de l'eau des rivières, la prédiction de la demande d'électricité et la modélisation des chauffe-eau solaires Ghritlahre & Prasad (2018).

5.2.2.2.3 Fonction tangente hyperbolique

La fonction tangente hyperbolique ($\tanh$) est similaire à la sigmoïde, mais ses valeurs de sortie sont comprises entre “-1” et “1”. La formule $\tanh$ est présentée dans l'Éq. 5.4.

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (5.4)$$

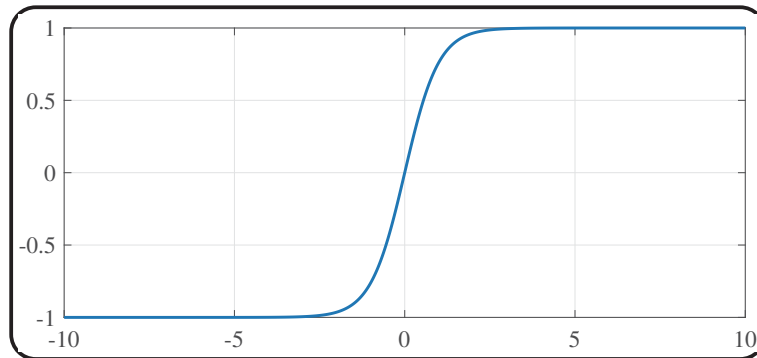


Figure 5.6 Tracé de la fonction d'activation tangente hyperbolique

La fonction ($\tanh$) offre une meilleure symétrie autour de zéro, ce qui peut faciliter l'apprentissage dans les réseaux de neurones.

5.2.2.2.4 Fonction softsign

La fonction (softsign) est similaire à ($\tanh$), mais ses asymptotes sont plus lisses, ce qui peut améliorer la saturation des neurones. La formule (softsign) est présentée dans l'Éq. 5.5.

$$f(x) = \text{softsign}(x) = \frac{x}{1 + |x|} \quad (5.5)$$

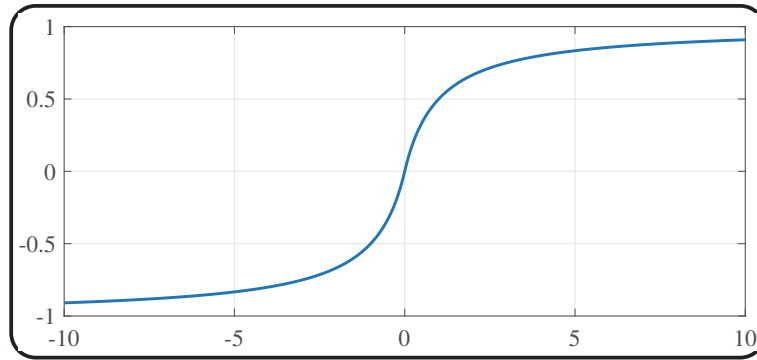


Figure 5.7 Tracé de la fonction d'activation softsign

Cette fonction est souvent utilisée dans des problèmes de classification d'images et d'inférence de température intérieure (Romeu et al., 2013).

5.2.2.2.5 Fonction unité linéaire rectifiée (ReLU)

Les neurones utilisant la fonction ReLU (Unité Linéaire Rectifiée) sont couramment utilisés dans les réseaux de neurones modernes, notamment pour la classification d'images. La formule de la fonction ReLU est présentée dans l'Éq. 5.6.

$$f(x) = \text{ReLU}(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < 0 \\ x & \text{pour } x \geq 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

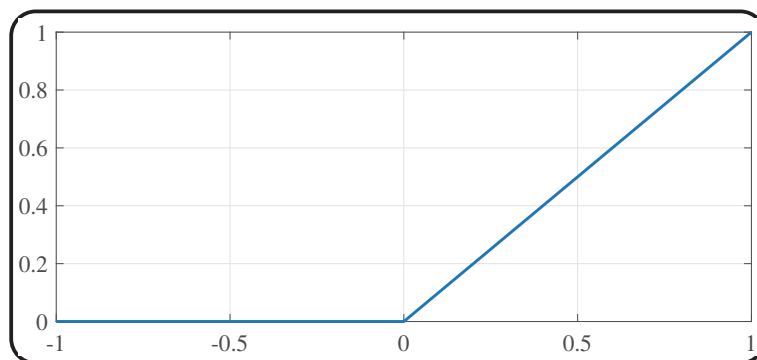


Figure 5.8 Tracé de la fonction d'activation unité linéaire rectifiée (ReLU)

La fonction ReLU est populaire en raison de sa simplicité et de son efficacité, et elle surpasse souvent d'autres fonctions d'activation dans des tâches de reconnaissance d'objets et d'analyse vidéo Kahou (2016).

Les fonctions d'activation jouent un rôle crucial dans les réseaux de neurones en introduisant la non-linéarité nécessaire pour modéliser des relations complexes. Le choix de la fonction d'activation dépend des spécificités du problème et des caractéristiques des données. Une compréhension approfondie de ces fonctions permet de concevoir des réseaux de neurones plus performants et adaptés aux besoins des applications modernes.

5.2.3 Types de réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels peuvent être classés en plusieurs types, chacun adapté à des applications spécifiques. Les principaux types de réseaux de neurones incluent les réseaux de neurones feedforward, les réseaux de neurones récurrents, les réseaux convolutifs et les réseaux de neurones génératifs adverses (GANs). Chacun de ces types a des caractéristiques uniques qui les rendent plus adaptés à certaines tâches que d'autres.

5.2.3.1 Réseaux de neurones feedforward

Les réseaux de neurones feedforward sont les plus simples et les plus couramment utilisés. Dans ces réseaux, les informations circulent dans une seule direction, de la couche d'entrée à la couche de sortie, sans boucles ni rétroactions. Ils sont particulièrement efficaces pour des tâches de classification et de régression.

Les réseaux de neurones feedforward offrent plusieurs avantages. Leur simplicité de conception et d'implémentation les rend accessibles pour de nombreux utilisateurs et applications. Ils performant bien pour les problèmes de classification et de régression et présentent une complexité computationnelle réduite par rapport aux autres types de réseaux.

Cependant, ils présentent également des inconvénients. Ils ne peuvent pas gérer efficacement les données séquentielles ou temporelles et sont sensibles aux problèmes de sur-ajustement (overfitting) lorsqu'ils sont appliqués à des ensembles de données complexes.

Les applications typiques des réseaux de neurones feedforward incluent la classification d'images statiques, la prédiction de séries temporelles et l'analyse de données structurées.

5.2.3.2 Réseaux de neurones récurrents

Les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont conçus pour traiter des séquences de données en introduisant des connexions récurrentes qui permettent aux informations de circuler non seulement de la couche d'entrée à la couche de sortie, mais aussi de retourner aux couches précédentes. Cette structure permet aux RNN de conserver une mémoire des entrées précédentes, ce qui les rend particulièrement adaptés aux tâches de traitement de séquences.

Les RNN offrent plusieurs avantages. Ils peuvent gérer des séquences de données et des dépendances temporelles, ce qui les rend utiles pour des tâches telles que la modélisation de séquences complexes. De plus, leur utilisation efficace de la mémoire permet de capturer des informations séquentielles de manière optimale.

Cependant, les RNN présentent des défis importants. Leur entraînement peut être difficile en raison du problème de gradient évanescent, et ils nécessitent des mécanismes de mémoire avancés pour gérer des séquences longues, tels que les LSTM ou les GRU. De plus, leur complexité computationnelle est plus élevée que celle des réseaux feedforward.

Les RNN sont largement utilisés dans des applications telles que la reconnaissance de la parole, la traduction automatique, la modélisation du langage naturel, et la prédiction de séries temporelles avec dépendances longues Schmidt (2019).

Les applications typiques des réseaux de neurones feedforward incluent la classification d'images statiques, la prédiction de séries temporelles et l'analyse de données structurées.

5.2.3.3 Réseaux convolutifs

Les réseaux convolutifs (CNN) sont spécialement conçus pour traiter des données structurées en grille, telles que les images. Ils utilisent des couches de convolution qui appliquent des filtres pour extraire des caractéristiques locales des données d'entrée. Les CNN sont particulièrement efficaces pour des tâches de vision par ordinateur.

Les CNN présentent plusieurs avantages. Ils offrent une excellente performance pour la reconnaissance et la classification d'images en apprenant des hiérarchies de caractéristiques complexes. De plus, le partage des poids dans les couches de convolution permet de réduire le nombre de paramètres, ce qui améliore l'efficacité du réseau.

Cependant, les CNN ont des inconvénients. Leur entraînement nécessite des ressources computationnelles élevées, et ils sont sensibles aux variations d'échelle et de rotation des images d'entrée. En outre, la complexité de leur architecture nécessite un réglage minutieux des hyperparamètres pour obtenir des performances optimales.

Les CNN sont largement utilisés dans des applications telles que la classification et la détection d'objets dans les images, la segmentation sémantique et instance des images, la reconnaissance de caractères et le traitement d'images médicales.

5.2.3.4 Réseaux de neurones génératifs adverses (GANs)

Les réseaux de neurones génératifs adverses (GANs) sont une classe de réseaux de neurones utilisés pour générer de nouvelles données à partir de données existantes. Un GAN se compose de deux réseaux : un générateur et un discriminateur. Le générateur produit des échantillons de données, tandis que le discriminateur agit comme un détective qui doit distinguer entre les données réelles provenant du jeu d'entraînement original et les données synthétiques produites par le générateur.

Les GANs présentent plusieurs avantages. Ils sont capables de générer des données réalistes et de haute qualité, ce qui les rend utiles pour la synthèse de données variées. De plus, la compétition

entre le générateur et le discriminateur permet une amélioration continue des performances du réseau.

Cependant, les GANs présentent également des défis. Leur entraînement peut être complexe et instable, nécessitant des ressources computationnelles importantes. De plus, évaluer objectivement la qualité des échantillons générés peut être difficile.

Les GANs trouvent des applications dans des domaines tels que la génération d'images et d'art numérique, la synthèse de visages réalistes, l'augmentation de données pour l'entraînement de modèles de machine learning, et la génération de données pour des simulations et des études de recherche.

Les différents types de réseaux de neurones offrent une flexibilité et une adaptabilité considérables pour une variété d'applications. Du traitement des séquences avec les RNN à l'analyse d'images avec les CNN, chaque type de réseau apporte des avantages uniques qui peuvent être exploités pour résoudre des problèmes spécifiques. Les GANs, avec leur capacité à générer de nouvelles données, ouvrent de nouvelles perspectives pour la recherche et le développement dans de nombreux domaines.

5.2.4 Phases des réseaux de neurones artificiels

Les RNA ont rapidement pris place comme un outil puissant pour résoudre des problèmes, en particulier ceux hautement non linéaires que les modèles traditionnels ne sont pas capables de résoudre ou n'atteignent pas la précision nécessaire. La mise en œuvre correcte d'un RNA est un processus méticuleux et peut être réalisée en suivant la méthodologie appropriée. Ceci garantit les performances maximales des algorithmes et la capacité du RNA à résoudre les problèmes qui se posent.

Le processus peut être divisé en trois phases principales. Dans la première phase, les données sont prétraitées avant d'entrer dans la couche d'entrée du RNA. La deuxième phase est appelée phase d'apprentissage ; ici, l'entraînement et le test sont effectués. Ces deux processus différents

sont réalisés en parallèle et ne doivent pas être séparés ; la capacité d'abstraction du modèle est développée au cours de cette phase. Enfin, dans la troisième phase, le modèle entraîné est validé en termes de qualité et d'ajustement obtenus dans de nouvelles inférences du RNA. Dans les sous-sections suivantes, chacune de ces phases sera détaillée.

5.2.4.1 Prétraitement des données

Avant que la phase d'apprentissage d'un RNA ne prenne place, l'ensemble de données doit être conditionné. Une partition correcte des données d'entrée-sortie disponibles, des prédicteurs et des variables de réponse en trois ensembles de données différents tels que les ensembles d'entraînement, de test et de validation doit être effectuée. Ces ensembles ont des rôles spécifiques pour la mise en œuvre réussie des RNA Altinay & Tulunay (1997). Pour l'instant, cette sous-section se concentrera sur le prétraitement des données, et les rôles de chaque ensemble de données seront détaillés dans les sous-sections suivantes.

En ce qui concerne les variables d'entrée, si elles sont mesurées sur des échelles différentes ou si les écarts-types des variables sont différents entre elles, une variable pourrait dominer les calculs suivants en raison de sa dimensionnalité Martínez, Schmuck, Pereverzyev Jr, Pirker & Haltmeier (2017). Par conséquent, les procédures de normalisation ou de standardisation sont l'alternative la plus viable pour traiter ces types de biais. De même, la normalisation des variables augmente l'efficacité computationnelle du processus d'entraînement du RNA, qui est également fortement améliorée en termes de résultats précis lorsqu'elle est couplée à des techniques de prétraitement Nawi, Atomi & Rehman (2013); Specht (1991).

Quand les variables d'entrée utilisent des échelles différentes, une variable peut dominer les calculs simplement par sa magnitude. La normalisation résout ce problème en ramenant toutes les variables sur une échelle comparable.

Cette standardisation améliore significativement l'efficacité computationnelle et la précision du processus d'entraînement. Elle permet au réseau d'attribuer des poids appropriés à chaque variable selon son importance réelle plutôt que selon sa taille absolue.

Dans les réseaux neuronaux, il existe fondamentalement deux types de techniques de prétraitement. La première consiste à standardiser les données en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type pour rendre les données de moyenne zéro et de variance un, appelée "normalisation Z-score" comme indiqué dans l'Éq. (5.7).

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (5.7)$$

Où x_i est une valeur d'entrée donnée d'une caractéristique spécifique ; μ est la moyenne de la caractéristique ; σ est l'écart-type ; et z_i est la valeur normalisée pour l'entrée donnée.

La deuxième Éq. (5.8) consiste à redimensionner les données à un petit intervalle de 0 à 1 en utilisant la "normalisation Min-Max".

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5.8)$$

Où x_i est une valeur d'entrée donnée d'une caractéristique spécifique ; x_{min} est la valeur minimale observée pour la caractéristique ; x_{max} est la valeur maximale observée ; et x'_i est la valeur normalisée ou redimensionnée pour l'entrée donnée.

La normalisation des données d'entrée avant un processus d'entraînement est cruciale pour accélérer de manière significative les calculs computationnels suivants et obtenir de meilleures sorties RNA. La normalisation des données affecte l'erreur de performance des estimateurs de paramètres entraînés à prédire la valeur de plusieurs variables Gnana Sheela & Deepa (2013); Sola & Sevilla (1997). Sans normalisation, les calculs de propagation dans le réseau seraient dominés par les variables ayant les plus grandes valeurs absolues, indépendamment de leur pertinence réelle pour le problème à résoudre.

5.2.4.2 Phase d'apprentissage

Le processus d'apprentissage des RNA est effectué par deux processus complémentaires : les phases d'entraînement et de test. Le processus d'apprentissage est un problème d'optimisation

multivariable qui peut impliquer des centaines ou des milliers de variables Martínez-Martínez, Escandón-Rivera, Morales-Matamoros, Tejeida-Padilla & Lina-García (2015). Pendant la phase d'apprentissage, les ensembles d'entraînement et de test sont utilisés pour ajuster le modèle jusqu'à ce qu'il atteigne la précision de sortie souhaitée.

L'ensemble d'entraînement est le plus grand ensemble de données, et il est utilisé par le réseau neuronal pour apprendre les patterns présents dans les données en ajustant ses poids et biais internes. L'ensemble de test, dont la taille varie de 10% à 30% de l'ensemble d'entraînement, est utilisé pour évaluer le surapprentissage d'un réseau supposé entraîné Kaastra & Boyd (1996). Les données de l'ensemble de test sont utilisées pour superviser le processus d'entraînement et éviter la mémorisation ou "overfitting". En d'autres termes, donner de bons résultats uniquement pour les données entraînées Dündar & Şahin (2013). Par conséquent, la phase d'entraînement peut être arrêtée au point où le réseau a la plus petite erreur de test ; si l'erreur de test commence à augmenter tandis que l'erreur d'entraînement diminue, l'overfitting se produit Zhang & Morris (1998).

Le "meilleur" réseau sur les données d'entraînement et de test est celui qui passe le mieux la phase d'apprentissage. Cependant, sa performance est finalement qualifiée sur les données de validation Zhang, Eddy Patuwo & Y Hu (2003). En d'autres termes, le RNA doit être entraîné, testé, et ensuite validé Belgrano, Malmgren & Lindahl (2002); Patanaik, Barik, Paikray & Misra (2018). Plusieurs études utilisent l'ensemble de test comme ensemble de validation pour l'évaluation finale des performances du modèle, pas dans la phase de test proprement dite Khashman (2010); Trejo-Perea, Herrera-Ruiz, Ríos-Moreno & Trejo-Macotella (2009); Yang, Chang, Chen & Yeh (2009). D'autres études n'utilisent pas tous les ensembles de données ou l'ensemble de test ou l'ensemble de validation Drucker, Schapire & Simard (1993); Kong *et al.* (2016); Leu, Lo & Chen (2001). Cette confusion peut être due au fait que le RNA est une technique particulière, qui a besoin de ces trois ensembles de données, pour entraîner, tester et valider le modèle, alors que pour d'autres techniques de prédiction, seuls deux ensembles de données sont généralement nécessaires soit un ensemble d'entraînement et un ensemble de test James, Witten, Hastie & Tibshirani (2013).

Dans la phase d'entraînement, le processus mathématique qui permet aux RNA de développer leur capacité d'abstraction repose sur ce qu'on appelle l'algorithme d'apprentissage. La capacité d'abstraction désigne l'aptitude remarquable du réseau à transformer des données brutes en représentations conceptuelles de plus haut niveau. Concrètement, cela signifie que le réseau apprend progressivement à identifier des caractéristiques importantes cachées dans les données, à reconnaître des patterns complexes et des relations non-linéaires, puis à créer des représentations internes simplifiées qui capturent l'essence de ces patterns. Par exemple, dans la reconnaissance d'images, un RNA développe sa capacité d'abstraction en apprenant d'abord à détecter des contours simples dans les premières couches, puis des formes géométriques dans les couches intermédiaires, et finalement des concepts de haut niveau comme "visage" ou "voiture" dans les dernières couches. Cette transformation hiérarchique de l'information brute vers des concepts abstraits constitue le cœur de la puissance des réseaux de neurones.

L'algorithme le plus utilisé pour développer cette capacité d'abstraction est la descente de gradient par rétropropagation. Sa popularité s'explique par sa simplicité conceptuelle, son universalité d'application, et sa large disponibilité dans de nombreuses bibliothèques d'apprentissage automatique modernes telles que TensorFlow et PyTorch pour Python, ou encore le Neural Network Toolbox pour MATLAB.

Le but de l'entraînement par rétropropagation est de modifier de manière itérative les paramètres des neurones (poids et biais) dans une direction qui minimise l'erreur globale du réseau. Cette erreur est quantifiée par ce qu'on appelle la fonction d'erreur, qui calcule essentiellement la différence entre la sortie souhaitée et le résultat réellement produit par le RNA sur l'ensemble des exemples d'entraînement et de test Örkücü & Bal (2011).

Le RNA possède des paramètres inconnus - les poids synaptiques et les biais - tout comme le perceptron. Ces paramètres déterminent directement la capacité d'abstraction du modèle en contrôlant la manière dont l'information se propage à travers le réseau. L'objectif de la phase d'apprentissage consiste à identifier les valeurs optimales pour ces paramètres afin que le modèle s'ajuste efficacement aux données d'entraînement.

L'initialisation des poids constitue une étape cruciale du processus. Généralement, les valeurs initiales des poids sont choisies aléatoirement dans un intervalle restreint autour de zéro, par exemple entre -0.1 et 0.1. Cette initialisation a une justification mathématique fondamentale : lorsque les poids sont proches de zéro, les entrées pondérées des neurones restent dans la région centrale des fonctions d'activation sigmoïdales.

Dans cette région centrale, les fonctions d'activation comme la sigmoïde se comportent de manière approximativement linéaire. Mathématiquement, cela signifie que la dérivée de la fonction d'activation est relativement constante, et que la fonction peut être approximée par une droite sur cet intervalle restreint. Ainsi, avec des poids initiaux petits, l'ensemble du réseau se comporte comme une combinaison de transformations linéaires, limitant sévèrement sa capacité à modéliser des relations complexes. Au fur et à mesure que l'entraînement progresse, les poids s'éloignent progressivement de zéro. Cette évolution force les neurones à opérer dans les régions non-linéaires de leurs fonctions d'activation, où la courbure caractéristique de ces fonctions devient significative. Cette transition graduelle de la linéarité vers la non-linéarité permet au réseau de développer sa capacité à identifier et modéliser des patterns complexes dans les données Cao, Lu & Xu (2015); Hastie, Tibshirani & Friedman (2009).

La procédure de rétropropagation constitue le mécanisme mathématique central qui permet au réseau d'apprendre efficacement. Pour comprendre son fonctionnement, imaginons le réseau comme une chaîne de transformations successives : chaque couche transforme les données qu'elle reçoit et les transmet à la couche suivante. La rétropropagation calcule le gradient de la fonction d'erreur par rapport à tous les paramètres du réseau - c'est-à-dire tous les poids et biais présents dans chaque couche de cette architecture multicouche.

Le principe mathématique sous-jacent repose sur l'application systématique de la règle de dérivation en chaîne. Cette règle permet de décomposer le calcul d'une dérivée complexe en une série de dérivées plus simples. Concrètement, pour calculer comment une modification d'un poids dans une couche profonde du réseau affecte l'erreur finale, la rétropropagation "remonte" la chaîne des calculs en sens inverse : elle commence par l'erreur à la sortie, puis calcule

successivement l'impact de cette erreur sur chaque couche précédente, jusqu'à atteindre les paramètres que l'on souhaite ajuster.

Cette propagation "à rebours" de l'information d'erreur explique le nom de l'algorithme. Au lieu de deviner aveuglément comment modifier les millions de paramètres du réseau, la rétropropagation fournit une direction précise et mathématiquement justifiée pour chaque ajustement. Cette approche systématique transforme ce qui pourrait être un problème d'optimisation insurmontable en une procédure efficace et fiable, formalisée mathématiquement par l'équation suivante :

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \hat{y}_{ij}} \times \frac{\partial \hat{y}_{ij}}{\partial z_{ij}} \times \frac{\partial z_{ij}}{\partial w_{ij}} \quad (5.9)$$

Où :

- E est la fonction d'erreur ou de coût.
- w_{ij} est un certain poids d'une certaine synapse.
- $\hat{y}_{ij}$ est une certaine sortie d'un neurone.
- z_{ij} est le produit du poids et d'une variable d'entrée.

La règle de la chaîne constitue un outil mathématique fondamental pour traiter les relations de dépendance fonctionnelle, c'est-à-dire les situations où une fonction dépend d'une autre fonction, qui elle-même dépend d'une troisième, et ainsi de suite. Comprendre cette notion est essentiel pour saisir le fonctionnement de la rétropropagation. Dans le contexte des réseaux de neurones, cette chaîne de dépendances s'illustre parfaitement. La fonction d'erreur (E) dépend directement de la sortie prédite du neurone ($\hat{y}$). Cette sortie prédite dépend à son tour de l'activation du neurone (z), qui résulte du produit entre les variables d'entrée et les poids synaptiques (w).

La beauté de la règle de la chaîne réside dans sa capacité à "démêler" cette chaîne complexe. Elle permet de calculer précisément comment une petite modification d'un poids w à la base de la chaîne se répercutera sur l'erreur E au sommet. Cette information directionnelle révèle exactement dans quel sens ajuster chaque paramètre pour réduire l'erreur globale.

L'équation ci-dessus décrit le gradient d'erreur par rapport à une correction de poids spécifique, mais le même principe s'applique identiquement aux biais, car ces deux types de paramètres sont ajustés selon le même mécanisme mathématique durant l'entraînement. Pour la rétropropagation complète, tous les gradients individuels - qu'ils concernent les poids ou les biais - sont calculés simultanément et combinés pour obtenir le gradient global de la fonction de coût du RNA. Cette information guide ensuite l'ajustement coordonné de tous les paramètres du réseau Rosenbaum & Johnson (1984).

L'idée clé est que la dérivée ou le gradient de la fonction d'erreur du RNA peut être calculé en procédant à rebours dans le réseau, depuis la couche de sortie vers les couches précédentes. La sortie du modèle de réseau initial et l'erreur correspondante sont calculées, puis, à chaque itération, de nouveaux poids et biais sont déterminés pour ajouter ou soustraire une valeur à ceux-ci. Cette valeur est appelée taux d'apprentissage. Encore une fois, de nouvelles sorties et erreurs sont déterminées, et si la nouvelle erreur est supérieure à la précédente, les nouveaux poids et biais sont rejetés. La valeur fixe est à nouveau ajoutée ou soustraite en fonction du gradient Rusk (2015); Singh & Singh (2015).

L'entraînement du réseau implique l'ajustement des poids de connexion pour mapper correctement l'ensemble d'entraînement afin d'obtenir une sortie souhaitable, du moins, dans une certaine limite d'erreur définie; c'est essentiellement un problème d'optimisation Palani, Liong & Tkalic (2008). En effet, le réseau apprend à partir de l'ensemble d'entraînement; si l'ensemble d'entraînement est satisfaisant et que l'algorithme d'entraînement est efficace, le réseau devrait alors être capable de prédire correctement la sortie même pour les entrées ne faisant pas partie de l'ensemble d'entraînement. Ce phénomène est appelé "généralisation" Bishop (1995); Punitha & Punithavalli (2013); Wang & Tang (2006).

La phase d'entraînement est une partie critique de l'utilisation des réseaux neuronaux. Pour un problème donné, l'entraînement du réseau est supervisé, étant donné que la cible pour chaque motif d'entrée est toujours connue a priori. Pendant le processus d'entraînement, les motifs ou exemples sont présentés à la couche d'entrée d'un réseau Zhang & Stanley (1999). Avec

l'algorithme de descente de gradient par rétropropagation, une recherche de descente de gradient est effectuée — elle mesure l'erreur de sortie et calcule le gradient de l'erreur en ajustant les poids dans la direction descendante du gradient Behrang, Assareh, Ghanbarzadeh & Noghabadi (2010); Sharma & Venugopalan (2014).

Les poids générés aléatoirement atteignent des vitesses d'apprentissage beaucoup plus rapides ; c'est pourquoi les poids et les biais sont généralement générés aléatoirement par l'algorithme Cao *et al.* (2018). La descente de gradient par rétropropagation est la règle par laquelle les poids sont modifiés. La raison pour laquelle elle est appelée technique de descente stochastique est que les modifications sont effectuées dans des ensembles de poids et de biais "a priori inconnus" Amari (1993). L'algorithme de rétropropagation est l'un des algorithmes d'apprentissage supervisé les plus puissants. Toutefois, s'il n'est pas bien employé, le RNA ne convergera pas vers le point d'erreur minimum ou il tombera dans un minimum local, pas le minimum global fig.5.9 et la vitesse de convergence peut être réduite Bi, Cai & Zhang (2005); Ding, Su & Yu (2011); Örkücü & Bal (2011).

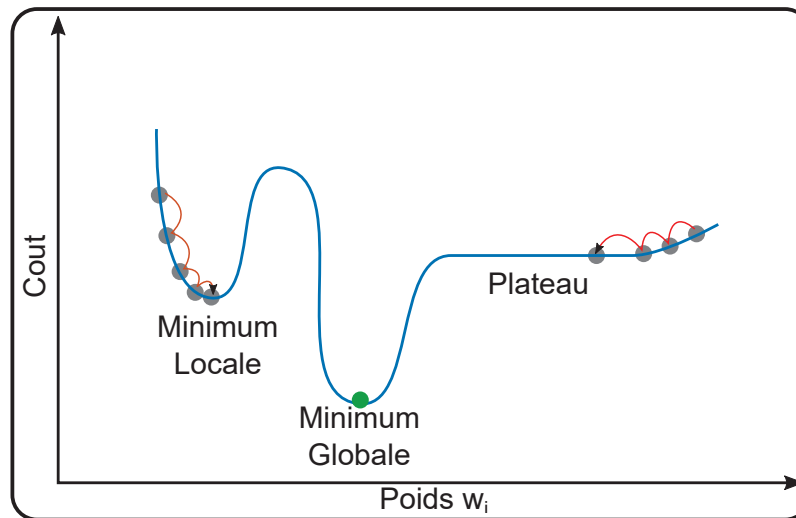


Figure 5.9 Exemple de la fonction d'erreur par rapport au gradient de poids pendant l'exécution de l'algorithme de rétropropagation

D'autres stratégies pour assurer de meilleures performances des algorithmes d'entraînement sont les critères d'arrêt et le nombre d'ensembles de données. Les critères d'arrêt peuvent

inclure l'arrêt après un certain nombre de passages à travers toutes les données d'entraînement et également l'arrêt lorsque l'erreur cible totale atteint un certain niveau bas, par exemple, moins de 2% pendant la phase d'apprentissage Palani *et al.* (2008). Surveiller l'erreur dans les ensembles d'entraînement et de test est également une bonne stratégie pour un arrêt précoce ; si l'erreur de test commence à augmenter par rapport à l'erreur d'entraînement, l'arrêt précoce de l'entraînement empêche l'overfitting Tetko, Livingstone & Luik (1995); Zhang & Morris (1998).

5.2.4.3 Phase de validation

Après la phase d'entraînement, la performance du RNA est évaluée sur l'ensemble de validation Ahmadi (2011); Altinay & Tulunay (1997); Jafar, Shahrour & Juran (2010). L'ensemble de validation doit être composé d'échantillons non inclus dans la phase d'apprentissage, c'est-à-dire dans les ensembles d'entraînement et de test, pour une évaluation appropriée du modèle Basma & Kallas (2004); Tian (2012). En termes de proportion de données nécessaires pour chaque ensemble de données, la division en trois parties suit la relation suivante : 70% pour le processus d'apprentissage, 15% pour la phase de test, et 15% pour la phase de validation Bal & Buyle-Bodin (2013), ou 50%, 25%, 25% respectivement, peut également être une alternative El Tabach, Lancelot, Shahrour & Najjar (2007) ainsi que d'autres proportions dans des plages similaires.

Lorsque les valeurs prédites par le RNA diffèrent significativement des valeurs observées durant la phase de validation, cela indique que le modèle nécessite un nouvel entraînement Palani *et al.* (2008); Yang *et al.* (2009). Pour améliorer les performances, deux actions sont recommandées :

- Réviser la procédure d'apprentissage utilisée,
- Augmenter la taille de l'ensemble de données d'entraînement.

La fonction de coût, qui mesure l'erreur entre les prédictions et les observations réelles, constitue un élément essentiel pour évaluer et améliorer la précision du réseau de neurones.

Dans les RNA, les fonctions de coût les plus utilisées sont l'erreur quadratique moyenne (EQM), l'erreur quadratique moyenne racine (EQMR), l'erreur absolue moyenne (EAM), l'erreur absolue

moyenne en pourcentage (EAMP), et l'entropie croisée (EC), entre autres. Ces fonctions peuvent être utilisées pendant les phases d'apprentissage et de validation, tandis que des fonctions telles que le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de détermination (R2) sont les plus appropriées exclusivement pour la phase de validation Ali, Abbas, Othman, Nor & Ahmad (2017); Ay & Kişi (2017); Cheng, Nian, He, Wang & Zhou (2018); Moghaddam, Moayeri & Mirzaei (2016); Sarkar & Pandey (2015).

L'algorithme EQM (5.10) est généralement choisi en raison de ses excellentes performances, relatives à l'algorithme de rétropropagation Zanetti, Duarte & Roes (2007) et c'est l'une des fonctions de coût les plus populaires dans les RNA Adya & Collopy (1998). La fonction EQM semble être adéquate lorsqu'on traite une seule variable dans une étude, car l'utilisation de plusieurs variables et de dimensions pour chacune rend la comparaison des erreurs plus difficile K  ksoy (2006).

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.10)$$

Où n est le nombre d'échantillons dans l'ensemble de données ; y_i est la donn  e réelle ; et $\hat{y}_i$ est l'estimation du RNA. La même symbologie sera appliqu  e aux équations restantes de cette section.

L'EQMR est calcul  e facilement, de la même manière que l'EQM, puis en prenant la racine carr  e de celle-ci (5.11). L'EQMR résume ainsi l'erreur globale du modèle, c'est-à-dire la précision du modèle Aptula, Jeliaskova, Schultz & Cronin (2005) ; la principale différence entre l'EQM et l'EQMR est que l'EQMR est plus utile lorsque les grandes erreurs sont particulièrement indésirables Saigal & Mehrotra (2012) et les petites erreurs tendent à être moins p  nalis  es.

$$EQMR = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5.11)$$

L'EAM, montr  e dans (5.12), est une mesure intuitivement attrayante. L'EAM pénalise la sous-prédiction et la sur-prédiction par rapport au résultat réel et est la mesure la plus naturelle de la magnitude moyenne de l'erreur, c'est une mesure sans ambiguïté de la magnitude moyenne

de l'erreur et elle est utile pour les comparaisons inter-modèles de performance avec différentes magnitudes et unités de mesure Willmott & Matsuura (2005).

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5.12)$$

Alors que l'EAM donne le même poids à toutes les erreurs, l'EQMR pénalise la variance — car elle donne plus de poids global aux erreurs avec des valeurs absolues plus grandes qu'aux erreurs avec des valeurs absolues plus petites. Lorsque les deux métriques sont calculées, l'EQMR est, par définition, jamais inférieure à l'EAM Chai & Draxler (2014).

Une modification de l'algorithme EAM est l'EAMP. Cet algorithme (5.13) est calculé par une comparaison terme par terme de l'erreur relative dans la prédiction par rapport à la valeur réelle de la variable. Par conséquent, l'EAMP est une statistique impartiale pour mesurer la capacité prédictive des modèles Wang, Chau, Cheng & Qiu (2009). L'EAMP est souvent utilisée en raison de son interprétation intuitive en termes d'erreur relative, mais juste viable lorsque la quantité à prédire est supérieure à zéro de Myttenaere, Golden, Le Grand & Rossi (2016); sinon, une division par zéro est produite, et aucun résultat ne peut dériver de cette formule.

$$EAMP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (5.13)$$

En ce qui concerne la fonction EC, cette technique d'erreur reflète la similarité entre les variables du point de vue de la probabilité Men, Liu, Wang, Zhao & Xu (2016). Cette fonction de coût (5.14) est fréquemment utilisée avec des RNA avec fonction d'activation softmax dans la couche de sortie Dahl, Sainath & Hinton (2013); Liew, Lim & Mellon (2016); Maas, Hannun & Ng (2013).

$$EC = - \sum_{i=1}^n y_i \times \log(\hat{y}_i) \quad (5.14)$$

Les fonctions de coût examinées jusqu'à présent sont éligibles pour les phases d'apprentissage et de validation. Néanmoins, certains algorithmes sont exclusivement utilisés pour la validation du modèle, tels que le R et le R^2 . Le R , comme montré dans (5.15), étudie le degré d'association

entre deux variables, c'est-à-dire qu'il définit dans quelle mesure une relation donnée est ajustée par une ligne droite Tripepi, Jager, Dekker & Zoccali (2008).

$$R = \frac{n \sum y_i \hat{y}_i - (\sum y_i)(\sum \hat{y}_i)}{\sqrt{[n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2][n \sum \hat{y}_i^2 - (\sum \hat{y}_i)^2]}} \quad (5.15)$$

Le R^2 est un algorithme (5.16) largement utilisé dans les réseaux de neurones artificiels pour évaluer la performance des modèles Gholami & Fakhari (2017), incluant des approches dans les problèmes de régression, de classification et de prédiction Ghritlahre & Prasad (2017); Moghaddam *et al.* (2016); Palani *et al.* (2008); Tetko *et al.* (1995); Turan, Aydin, Dugenci & Demirci (2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.16)$$

Les fonctions de coût et l'évaluation du modèle sont des tâches cruciales dans les essais des réseaux de neurones artificiels. Il n'existe pas de solution universelle pour une meilleure performance, et la plupart du travail de création de modèles de bonne qualité consiste à tester non seulement différentes architectures de réseau, mais aussi les fonctions de coût et la performance dans les échantillons de validation. Une fois que plusieurs modèles sont évalués, il peut être conclu que l'RNA sélectionné est le plus pertinent pour résoudre le problème.

5.3 Optimisation par essaim de particules

L'OEP est une technique d'optimisation inspirée des comportements collectifs observés dans la nature, tels que les bancs de poissons ou les vols d'oiseaux. Développée par Kennedy et Eberhart en 1995 Kennedy & Eberhart (1995), cette technique s'appuie sur des concepts issus de l'intelligence collective pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation. OEP utilise un ensemble de solutions potentielles appelées particules, lesquelles se déplacent dans l'espace de recherche du problème pour trouver la solution optimale.

Le concept d'OEP repose sur la modélisation d'un ensemble de particules, chacune représentant une solution potentielle du problème à optimiser. Ces particules se déplacent en fonction de

leur propre expérience et de celle de leurs voisins. Chaque particule i est caractérisée par sa position $\mathbf{x}_i$ et sa vitesse $\mathbf{v}_i$. La qualité de la position d'une particule est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Chaque particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, notée $\mathbf{p}_i$, et la meilleure position atteinte par l'ensemble des particules est notée $\mathbf{g}$.

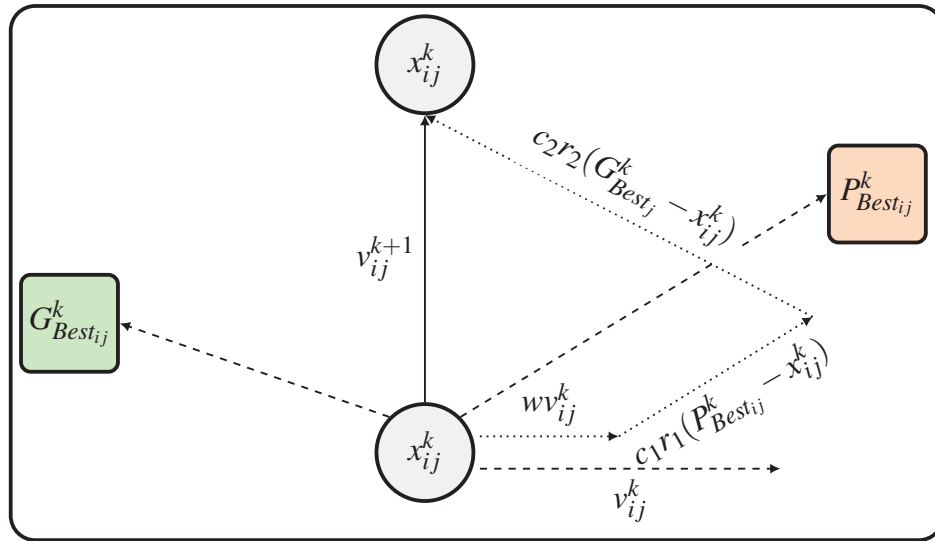


Figure 5.10 Déplacement d'une particule

À chaque itération, la position et la vitesse de chaque particule sont mises à jour selon les équations suivantes :

$$\mathbf{v}_i(t+1) = w\mathbf{v}_i(t) + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i(t)) + c_2 r_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}_i(t)) \quad (5.17)$$

et :

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t+1) \quad (5.18)$$

Où $\mathbf{v}_i(t)$ est la vitesse de la particule i à l'itération t , $\mathbf{x}_i(t)$ est la position de la particule i à l'itération t , w est le facteur d'inertie contrôlant l'importance de la vitesse précédente, c_1 et c_2 sont les coefficients d'accélération pondérant les influences des meilleures positions personnelle et globale, r_1 et r_2 sont des variables aléatoires uniformément distribuées entre 0 et 1, $\mathbf{p}_i$ est la

meilleure position personnelle atteinte par la particule i , et $\mathbf{g}$ est la meilleure position globale atteinte par l'ensemble des particules.

Le facteur d'inertie w joue un rôle crucial dans l'équilibre entre exploration et exploitation de l'espace de solutions. Un w élevé favorise l'exploration en permettant aux particules de se déplacer plus librement à travers l'espace de recherche, tandis qu'un w faible privilégie l'exploitation des régions déjà explorées en ralentissant les particules et en les concentrant autour des meilleures solutions trouvées.

Les coefficients d'accélération c_1 et c_2 déterminent l'importance respective des composantes cognitive et sociale. Le coefficient c_1 contrôle l'attraction de chaque particule vers sa meilleure position personnelle, favorisant l'exploration individuelle. Le coefficient c_2 contrôle l'attraction de chaque particule vers la meilleure position globale, favorisant la convergence collective vers la solution optimale.

La combinaison des paramètres w , c_1 et c_2 permet de régler l'équilibre entre les phases de diversification et d'intensification du processus de recherche. Clerc & Kennedy (2002) ont démontré qu'une bonne convergence peut être obtenue en rendant ces paramètres dépendants. L'utilisation d'un facteur de constriction χ permet de prévenir la divergence de l'essaim. L'équation (5.17) devient alors :

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \chi (\mathbf{v}_i(t) + \phi_1 c_1 (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i(t)) + \phi_2 c_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}_i(t))) \quad (5.19)$$

et :

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad \phi = \phi_1 + \phi_2 > 4 \quad (5.20)$$

L'algorithme OEP se distingue par sa simplicité conceptuelle et sa facilité d'implémentation. Il a été largement adopté pour résoudre une variété de problèmes d'optimisation grâce à sa capacité à éviter les minima locaux et à converger rapidement vers des solutions satisfaisantes.

L'OEP est particulièrement utile dans les problèmes où l'espace de recherche est complexe et non linéaire, rendant les techniques d'optimisation traditionnelles inefficaces.

Les différentes étapes de l'algorithme OEP sont résumées dans l'algorithme suivant :

Algorithme 1 : Algorithme PSO

```

Données :  $S, D, x_{max}, x_{min}, v_{max}, v_{min}$ 
Résultat : La meilleure solution globale  $G_{Best}$ 
1 Fonction PSO( $S, D, x_{max}, x_{min}, v_{max}, v_{min}$ )
2
  // Initialiser toutes les particules
3 pour chaque particule  $i$  dans  $S$  faire
4   pour chaque dimension  $d$  dans  $D$  faire
5     // Initialiser la position et la vitesse de la particule
6      $v(i, d) = Rand(v_{min}(d), v_{max}(d))$ 
7      $x(i, d) = Rand(x_{min}(d), x_{max}(d))$ 
8   fin
9   // Initialiser la meilleure position de la particule
10   $P_{Best}(i, :) = x(i, :)$ 
11  // Mettre à jour la meilleure position globale
12  si  $f(P_{Best}(i, :)) < f(G_{Best})$  alors
13     $G_{Best} = P_{Best}(i, :)$ 
14  fin
15 fin
16 répéter
17   pour chaque particule  $i$  dans  $S$  faire
18     pour chaque dimension  $d$  dans  $D$  faire
19       // Mettre à jour la position et la vitesse de la particule
20        $v(i, d) = w \cdot v(i, d) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{Best}(i, d) - x(i, d)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{Best}(d) - x(i, d))$ 
21        $x(i, d) = x(i, d) + v(i, d)$ 
22     fin
23     // Mettre à jour la meilleure position de la particule
24     si  $f(x(i, :)) < f(P_{Best}(i, :))$  alors
25        $P_{Best}(i, :) = x(i, :)$ 
26     fin
27     // Mettre à jour la meilleure position globale
28     si  $f(P_{Best}(i, :)) < f(G_{Best})$  alors
29        $G_{Best} = P_{Best}(i, :)$ 
30     fin
31   fin
32   // Avancer l'itération
33    $it = it + 1$ 
34 jusqu'à  $it > Max\_Iteration$ 

```

En plus de ces aspects théoriques, l'OEP a été appliqué à divers problèmes pratiques, notamment dans le domaine des systèmes de puissance. Par exemple, l'OEP a été utilisé pour la gestion des micros-réseaux, permettant d'optimiser la distribution de la charge et de minimiser les pertes Moghaddam, Seifi, Niknam & Alizadeh Pahlavani (2011). Ces applications démontrent la robustesse et la flexibilité de l'algorithme OEP dans des scénarios réels et complexes.

L'OEP est particulièrement efficace pour les problèmes nécessitant une optimisation globale et peut être adapté pour traiter des problèmes multi-objectifs. Les travaux récents montrent également des améliorations et des variations de l'algorithme OEP, telles que l'introduction de mécanismes adaptatifs pour ajuster dynamiquement les paramètres de l'OEP afin d'améliorer sa performance et sa convergence.

5.4 Conclusion

Ce chapitre a exploré en détail deux techniques puissantes dans le domaine de l'intelligence artificielle et de l'optimisation : les RNA et l'OEP. Les RNA, avec leur capacité à apprendre des motifs complexes à partir de données, se révèlent être des outils essentiels pour de nombreuses applications, allant de la reconnaissance d'images à la prédiction de séries temporelles. D'autre part, l'optimisation par essaim de particules, inspirée des comportements collectifs naturels, offre une technique robuste et efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

L'intégration de ces deux techniques dans une approche unifiée ouvre de nouvelles perspectives pour le contrôle et l'optimisation des systèmes. En combinant la capacité d'apprentissage des RNA avec l'efficacité de recherche de solutions optimales d'OEP, il est possible de développer des systèmes de contrôle avancés capables de s'adapter et de s'optimiser en temps réel. Cette synergie permet non seulement d'améliorer les performances des systèmes mais aussi d'assurer une grande flexibilité opérationnelle.

Le chapitre suivant approfondira cette combinaison, en développant une technique de contrôle de statisme avancée. Cette technique sera conçue pour répondre aux défis posés par les systèmes

modernes de génération d'énergie distribuée, optimisant les performances et la fiabilité des opérations.

CHAPITRE 6

TECHNIQUES DE CONTRÔLE DE STATISME POUR LES MICRO-RÉSEAUX

6.1 Introduction

L'intégration croissante de GED et des sources renouvelables dans les réseaux électriques impose de nouveaux défis pour la gestion des MRs, tant en mode autonome qu'en mode connecté. Face à ces enjeux, le CSC traditionnel montre ses limites, bien qu'efficace dans des conditions stables :

- La variabilité inhérente des sources d'énergie renouvelables
- La faible inertie des systèmes dominés par l'électronique de puissance
- Les changements rapides de charge dans les MRs modernes
- La complexité croissante des réseaux de distribution
- Les exigences de qualité de l'énergie de plus en plus strictes

Pour répondre à ces défis, ce chapitre propose deux approches innovantes adaptées aux différents modes de fonctionnement des MRs :

- **Mode autonome** : Une technique hybride combinant un RNA et OEP est développée. Cette approche, s'appuyant sur les concepts présentés dans le chapitre précédent, vise à améliorer la stabilité et l'efficacité des convertisseurs de puissance CC-CA utilisés dans les unités de GED. L'utilisation du RNA permet une adaptation dynamique aux conditions changeantes, tandis que l'OEP optimise les paramètres de contrôle pour différents points de fonctionnement.
- **Mode connecté au réseau** : Une stratégie basée sur les caractéristiques de puissance conformes à la norme IEEE 1547 est proposée. Cette approche garantit une intégration harmonieuse des GEDs au réseau principal tout en maintenant la stabilité du système global.

6.2 Contrôle de statique en mode autonome

6.2.1 Contrôle de statique conventionnel

La répartition de la puissance au sein des MRs représente un défi significatif pour la gestion efficace des convertisseurs opérant en parallèle. Historiquement, les systèmes de contrôle des convertisseurs parallèles s'appuyaient sur des infrastructures de communication, requérant une proximité géographique et des canaux à large bande passante. Néanmoins, cette approche devient problématique dans les MRs contemporains, où les unités GEDs et les charges peuvent être dispersées sur de vastes zones géographiques Guerrero, Vasquez, Matas, de Vicuna & Castilla (2011a).

6.2.1.1 Principe fondamental

Afin de surmonter ces limitations, le CSC a été développé comme une solution décentralisée. Le principe fondamental du CSC repose sur l'émulation du comportement des générateurs synchrones traditionnels, permettant une répartition efficace de la puissance sans dépendre des infrastructures de communication.

Un modèle simplifié du système est présenté à la figure 6.1, illustrant le transfert de puissance entre une unité GED et le point de connexion commun (PCC).

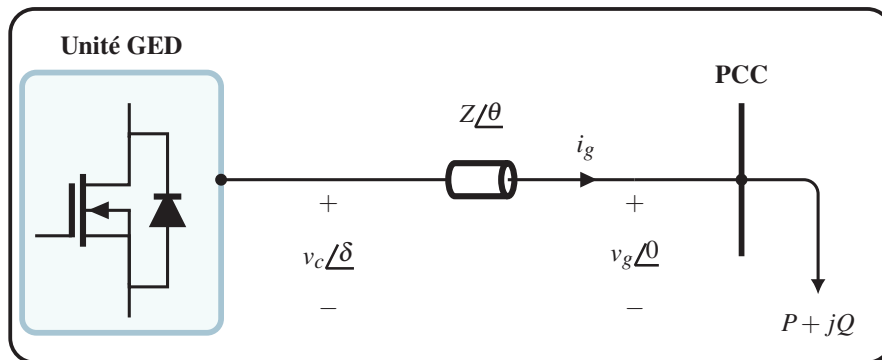


Figure 6.1 Modèle simplifié d'un convertisseur de puissance connecté au réseau par une impédance de ligne

Le modèle représente les principales grandeurs électriques du système. La tension de sortie du convertisseur après filtrage est notée v_c avec un angle de phase δ , tandis que v_g désigne la tension au point de connexion commun (PCC). L'impédance de ligne est modélisée par $Z = R + jX = |Z|\angle\theta$, où l'angle d'impédance $\theta = \arctan(X/R)$ caractérise le rapport entre les composantes réactive et résistive. La puissance apparente au point de connexion s'exprime sous la forme $S = P + jQ$.

La relation fondamentale entre les tensions et la puissance complexe est donnée par :

$$S = VI_g^* = \frac{VV_s\angle(\phi - \delta)}{Z} - \frac{V^2\angle\phi}{Z} \quad (6.1)$$

En décomposant cette expression en parties réelle et imaginaire, les expressions des puissances active et réactive sont obtenues :

$$\begin{aligned} P &= \frac{v_c}{R^2 + X^2} [R(v_c - v_g \cos(\theta)) + Xv_g \sin(\delta)] \\ Q &= \frac{v_c}{R^2 + X^2} [X(v_c - v_g \cos(\theta)) - Rv_g \sin(\delta)] \end{aligned} \quad (6.2)$$

Pour simplifier l'analyse, de faibles différences d'angle de phase ($\delta \approx 0$) sont généralement considérées, ce qui permet les approximations suivantes : $\cos(\delta) \approx 1$ et $\sin(\delta) \approx \delta$.

Cette modélisation permet d'analyser le comportement du système selon trois configurations d'impédance distinctes : inductive, résistive et mixte, chacune nécessitant une stratégie de contrôle adaptée.

6.2.1.2 Contrôle de statisme pour réseau inductif

Dans les réseaux haute tension, l'impédance de ligne est caractérisée par une composante inductive dominante ($X \gg R$) Bevrani, Francois & Ise (2017c). Cette caractéristique permet de négliger la composante résistive, simplifiant considérablement l'analyse en approximant l'angle d'impédance à $\theta \approx 90^\circ$.

Dans ces conditions, les expressions des puissances active et réactive se réduisent à :

$$\begin{aligned} P &\approx \frac{v_c v_g}{X} \sin(\delta) \approx \frac{v_c v_g}{X} \delta, \\ Q &\approx \frac{v_c v_g}{X} \cos(\delta) - \frac{v_g^2}{X} \approx \frac{v_c v_g}{X} - \frac{v_g^2}{X}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

L'analyse des dérivées partielles révèle les relations fondamentales de contrôle :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \delta} &= \frac{v_c v_g}{X}, & \frac{\partial P}{\partial v_c} &= \frac{v_g \delta}{X}, \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} &= 0, & \frac{\partial Q}{\partial v_c} &= \frac{v_g}{X}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Ces relations mettent en évidence trois caractéristiques essentielles du contrôle de statisme inductif. Premièrement, la puissance active P peut être principalement contrôlée par l'ajustement de l'angle δ , offrant ainsi un levier direct sur le transfert de puissance. Deuxièmement, la puissance réactive Q est régulée efficacement par la variation de l'amplitude de la tension v_c , permettant un contrôle précis du bilan réactif. Enfin, un découplage naturel existe entre les contrôles de P et Q , facilitant leur régulation indépendante et simplifiant considérablement la conception du système de contrôle.

Les équations de contrôle de statisme pour un MR inductif sont exprimées par :

$$\begin{aligned} f &= f^* - f_p(P - P^*), \\ v_c &= v_c^* - v_q(Q - Q^*). \end{aligned} \quad (6.5)$$

où :

- P^*, Q^* : puissances active et réactive de référence de l'unité de GED,
- f^*, v_c^* : fréquence et tension nominales du système,
- f_p, v_q : coefficients de statisme déterminant la pente des caractéristiques.

Pour exploiter ces caractéristiques, des courbes de statisme $P-f$ et $Q-V$ sont implémentées, comme illustré à la figure 6.2.

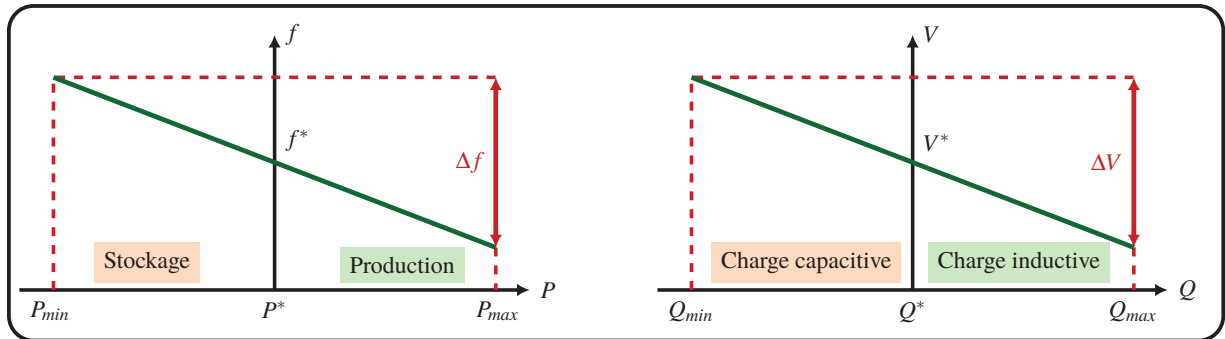


Figure 6.2 Caractéristiques de statisme pour le réseau inductif

La mise en œuvre pratique de ce contrôle est réalisée selon le schéma présenté à la figure 6.3.

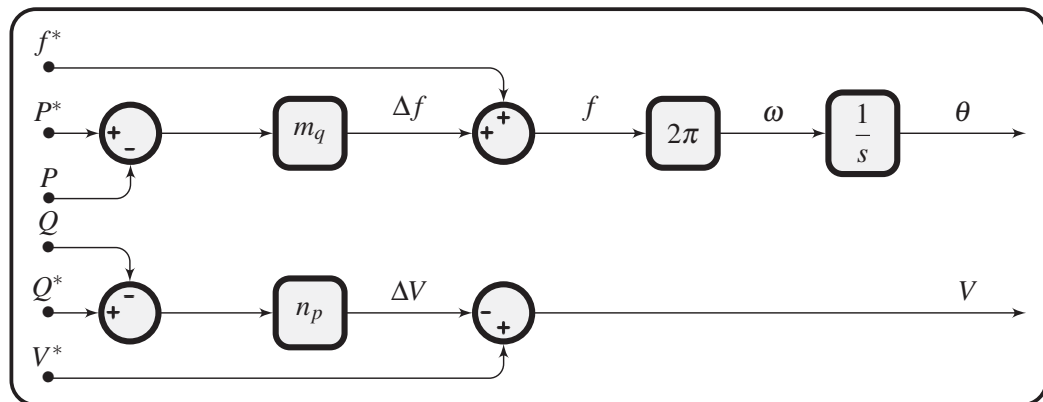


Figure 6.3 Schéma de contrôle de statisme pour réseau inductif

Cette approche de contrôle, bien qu'efficace pour les réseaux haute tension à dominante inductive, présente des limitations dans les réseaux basse tension où l'impédance peut avoir un caractère plus résistif ou mixte. Ces cas nécessitent des stratégies de contrôle adaptées, qui seront discutées dans les sections suivantes.

6.2.1.3 Contrôle de statisme pour réseau résistif

Dans les réseaux moyenne et basse tension, l'impédance de ligne présente souvent un caractère principalement résistif ($R \gg X$) Bevrani *et al.* (2017c). Cette caractéristique permet de négliger la composante inductive, conduisant à un angle d'impédance $\theta \approx 0^\circ$. Cette configuration nécessite une approche de contrôle différente de celle utilisée pour les réseaux inductifs.

En appliquant ces conditions à l'équation (6.2), les expressions des puissances active et réactive se simplifient comme suit :

$$\begin{aligned} P &\approx \frac{v_c v_g}{R} \cos(\delta) - \frac{v_g^2}{R} \approx \frac{v_c v_g}{R} - \frac{v_g^2}{R}, \\ Q &\approx \frac{v_c v_g}{R} \sin(\delta) \approx \frac{v_c v_g}{R} \delta. \end{aligned} \quad (6.6)$$

L'analyse des dérivées partielles révèle un comportement fondamentalement différent du cas inductif :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \delta} &= 0, & \frac{\partial P}{\partial v_c} &= \frac{v_g}{R}, \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} &= \frac{v_c v_g}{R}, & \frac{\partial Q}{\partial v_c} &= \frac{v_g \delta}{R}. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Cette analyse met en évidence trois caractéristiques clés du contrôle en réseau résistif qui se distinguent fondamentalement du cas inductif. Premièrement, la puissance active P est principalement contrôlée par les variations de l'amplitude de tension v_c , établissant ainsi un lien direct entre la régulation de tension et le transfert de puissance active. Deuxièmement, la puissance réactive Q devient sensible aux variations de l'angle δ , créant une dépendance angulaire absente dans les réseaux inductifs. Enfin, les relations de contrôle sont inversées par rapport au cas inductif, nécessitant une adaptation complète des stratégies de contrôle et une reconfiguration des boucles de régulation.

Les équations de contrôle de statisme pour un MR résistif s'expriment alors par :

$$\begin{aligned} f &= f^* - f_q(Q - Q^*), \\ v_c &= v_c^* - v_p(P - P^*). \end{aligned} \quad (6.8)$$

où :

- v_p : coefficient de statisme pour le contrôle P - V ,
- f_q : coefficient de statisme pour le contrôle Q - f .

En conséquence, les caractéristiques de statisme doivent être modifiées comme illustré à la figure 6.4.

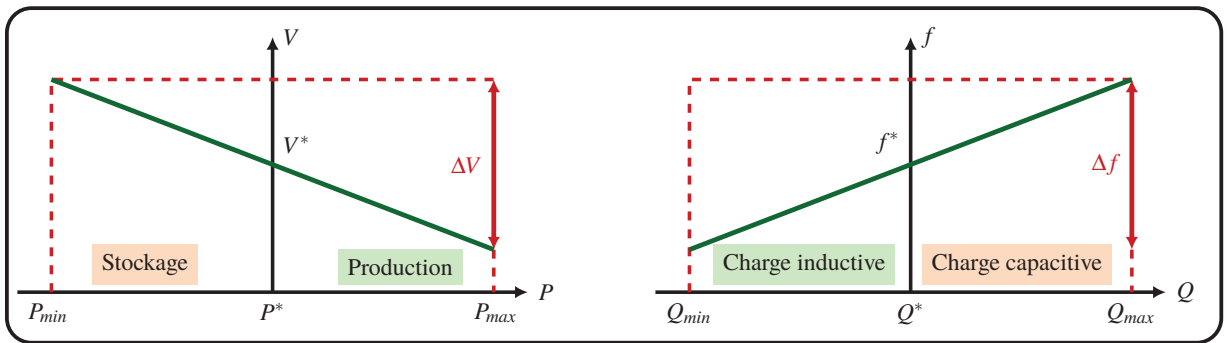


Figure 6.4 Caractéristiques de statisme pour le réseau résistif

Le schéma de mise en œuvre de ce contrôle est présenté à la figure 6.5.

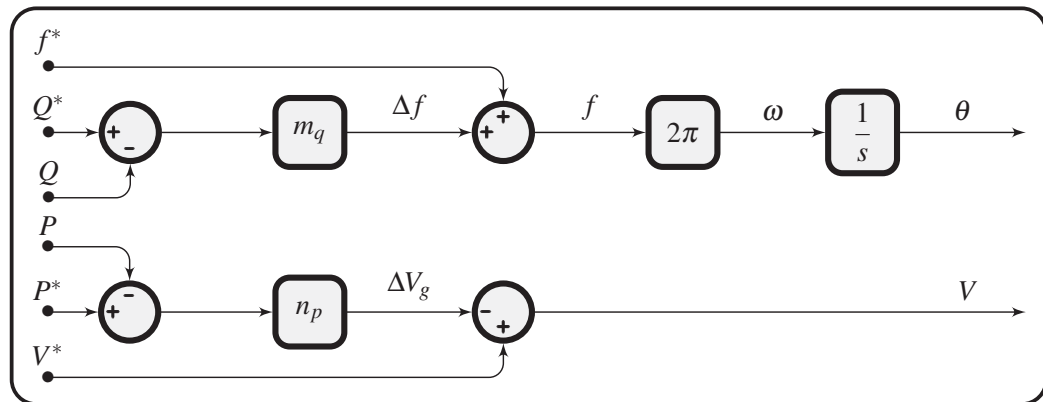


Figure 6.5 Schéma de contrôle de statisme pour réseau résistif

Cette approche, bien qu'adaptée aux réseaux à dominante résistive, présente des limitations dans les réseaux où les composantes résistive et inductive sont comparables. Cette situation fréquente dans les MRs basse tension, nécessite une approche plus sophistiquée qui sera présentée dans la section suivante sur le cas général d'impédance mixte.

6.2.1.4 Cas Général d'impédance mixte

Dans les MRs basse tension, l'impédance de ligne présente souvent un caractère mixte où les composantes résistive et inductive sont du même ordre de grandeur ($R \approx X$) Bevrani *et al.* (2017c). Cette configuration crée un couplage complexe entre les puissances active et réactive, rendant les approches conventionnelles moins efficaces.

Pour gérer ce couplage, une transformation des variables de puissance est nécessaire. Une matrice de rotation T est introduite pour transformer les puissances active et réactive (P, Q) en composantes découplées (P_r, Q_r) :

$$\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

où $\phi = \theta$ représente l'angle d'impédance de ligne. Les composantes transformées s'expriment alors par :

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{R}{Z}P + \frac{X}{Z}Q, \\ Q_r &= -\frac{X}{Z}P + \frac{R}{Z}Q. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Pour un petit angle de phase δ , les relations de puissance dans le repère transformé deviennent :

$$\begin{aligned} P_r &\approx \frac{v_c v_g}{Z} \cos(\delta - \theta) - \frac{v_g^2}{Z} \cos(\theta), \\ Q_r &\approx \frac{v_c v_g}{Z} \sin(\delta - \theta) - \frac{v_g^2}{Z} \sin(\theta). \end{aligned} \quad (6.11)$$

Les équations de contrôle de statisme généralisées s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} f - f^* &= -f_p \frac{R}{Z} (P - P^*) - f_q \frac{X}{Z} (Q - Q^*), \\ v_c - v_c^* &= -v_p \frac{X}{Z} (P - P^*) + v_q \frac{R}{Z} (Q - Q^*). \end{aligned} \quad (6.12)$$

où :

- f_p, f_q : coefficients de contrôle de la fréquence,
- v_p, v_q : coefficients de contrôle de la tension,
- $\frac{R}{Z}, \frac{X}{Z}$: facteurs de pondération reflétant la nature mixte de l'impédance.

Le schéma de contrôle résultant est illustré à la figure 6.6.

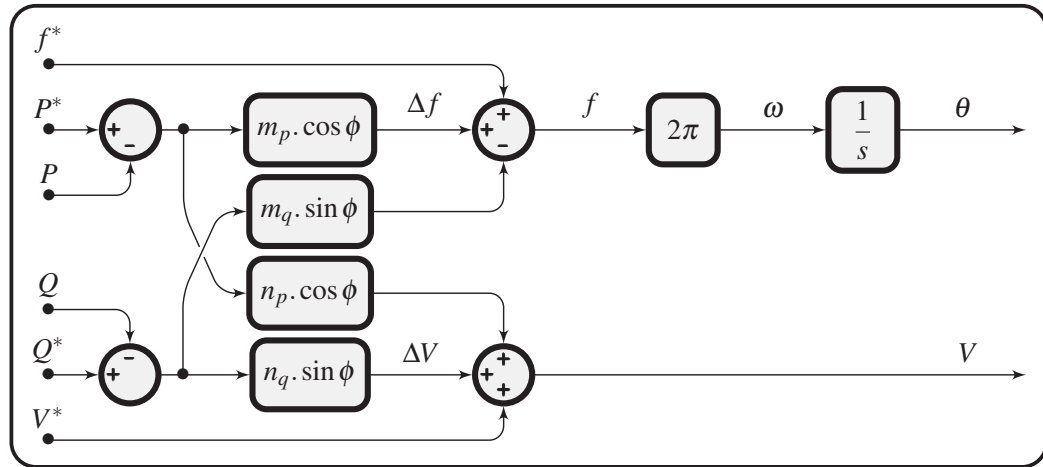


Figure 6.6 Schéma de contrôle de statisme pour réseau à impédance mixte

Cette approche présente plusieurs défis pratiques qui limitent son efficacité. L'estimation d'impédance constitue un premier obstacle, car la précision du contrôle dépend fortement de la connaissance exacte du ratio X/R , qui peut varier selon les conditions d'opération. La dynamique couplée représente un second défi, le couplage résiduel entre P et Q pouvant ralentir la réponse du système et compliquer la stabilisation. Enfin, les variations d'impédance dues aux changements de charge peuvent affecter significativement la performance du contrôle.

Pour améliorer les performances dans ces conditions complexes, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Le contrôle adaptatif permet un ajustement dynamique des paramètres de

contrôle selon les conditions d'opération, tandis que le découplage actif introduit des termes de compensation dans les boucles de contrôle pour minimiser les interactions. L'utilisation de techniques avancées basées sur l'intelligence artificielle offre également une approche prometteuse pour gérer la complexité inhérente du système.

Ces limitations du contrôle de statisme conventionnel, particulièrement évidentes dans le cas d'impédance mixte, motivent le développement d'approches plus sophistiquées. La section suivante présente une solution innovante basée sur l'intégration des réseaux de neurones artificiels et de l'optimisation par essais particuliers.

6.2.2 Technique de contrôle de statisme proposée

Face aux limitations du contrôle de statisme conventionnel, particulièrement dans les réseaux à impédance mixte, une approche innovante combinant les RNA et l'OEP est proposée. Cette technique vise à améliorer significativement les performances des convertisseurs CC-CA des unités GED au sein des MRs.

6.2.2.1 Principes fondamentaux et contributions

L'approche proposée repose sur deux composantes principales :

1. **Réseau de Neurones Artificiels** : Exploite sa capacité d'apprentissage pour modéliser les relations complexes entre les puissances et les tensions de référence, permettant une adaptation dynamique aux variations de charge.
2. **Optimisation par Essais Particulaires** : Génère un ensemble de données d'entraînement optimisé en explorant efficacement l'espace des solutions possibles.

Les contributions majeures de cette technique se déclinent en quatre axes principaux. L'amélioration de la stabilité est assurée par l'adaptation dynamique du RNA aux variations de charge, garantissant une meilleure résilience du MR. L'optimisation des performances est obtenue grâce à l'OEP qui identifie les paramètres optimaux pour différents points d'opération, maximisant ainsi l'efficacité globale du système. La modélisation précise est rendue possible par

la base de données générée par l'OEP, permettant un entraînement robuste du RNA avec une couverture complète de l'espace opérationnel. Enfin, la flexibilité accrue résulte de la combinaison RNA-OEP qui offre une adaptabilité supérieure aux variations des conditions d'opération, dépassant les limitations des approches conventionnelles.

6.2.2.2 architecture du système de contrôle

La structure de contrôle proposée, illustrée à la figure 6.7, intègre trois composantes essentielles :

1. Contrôle de puissance par RNA :

- Génère les tensions de référence découplées dq ,
- Assure un partage de puissance optimal entre les unités GED,
- S'adapte dynamiquement aux variations de charge.

2. Contrôle de Tension :

- Régule la tension du condensateur de filtrage,
- Génère les courants de référence dq ,
- Maintient la stabilité de la tension de sortie.

3. Contrôle de Courant :

- Produit les signaux de tension pour la modulation de largeur d'impulsion (MLI),

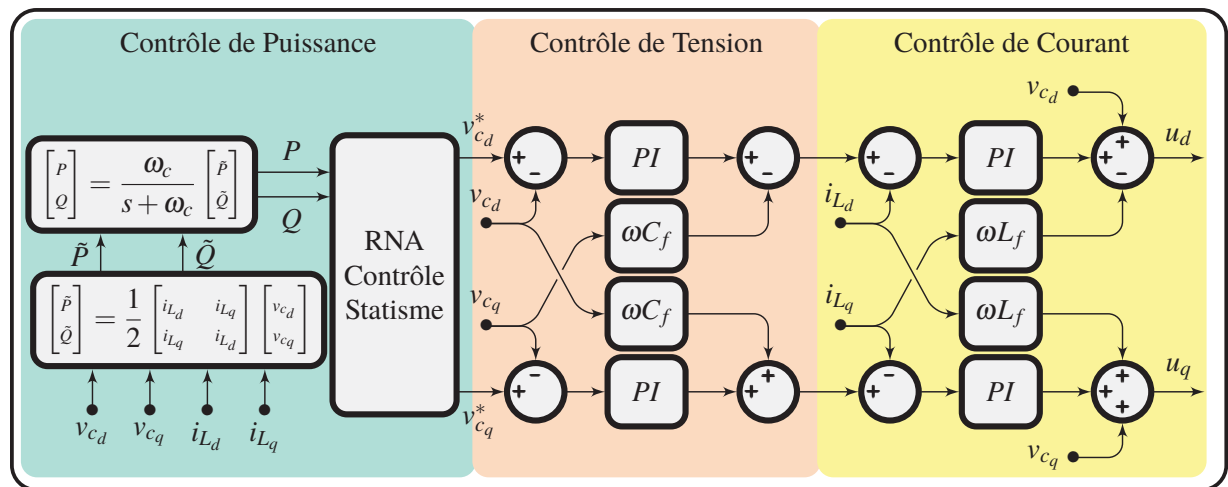


Figure 6.7 Structure du contrôle proposé pour convertisseur CC-CA monophasé

- Gère les variations du courant de l'inducteur,
- Améliore la qualité de l'énergie (réduction du taux de distorsion harmonique, TDH).

6.2.2.3 Boucle de contrôle de partage de puissance

Le partage efficace de puissance entre les convertisseurs CC-CA constitue un élément crucial du système de contrôle proposé. Cette boucle de contrôle utilise les mesures de tension v_c et de courant i_L pour optimiser la distribution de puissance au sein du MR.

Les puissances active et réactive instantanées ($\tilde{P}, \tilde{Q}$) sont calculées dans le repère dq selon l'équation :

$$\begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{L_d} & i_{L_q} \\ i_{L_q} & i_{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c_d} \\ v_{c_q} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Pour obtenir les composantes fondamentales des puissances active et réactive (P, Q), les puissances instantanées sont traitées par des filtres passe-bas ont la fonction de transfert est :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

où ω_c représente la fréquence de coupure du filtre en rad/s. Ce filtrage joue un rôle essentiel dans la qualité du contrôle en éliminant les composantes harmoniques indésirables qui pourraient perturber la boucle de régulation. Il permet également d'obtenir des valeurs moyennes stables des puissances active et réactive, facilitant ainsi la prise de décision du contrôleur. Enfin, cette opération de filtrage améliore significativement la précision du contrôle en réduisant l'impact des fluctuations haute fréquence sur les références générées.

Cette approche de contrôle offre plusieurs avantages opérationnels significatifs. Elle assure une réponse rapide aux variations de charge grâce à l'adaptation dynamique du RNA, permettant au système de s'ajuster efficacement aux changements des conditions de fonctionnement. La

stabilité accrue du système résulte de la modélisation précise des relations non linéaires par le réseau de neurones, minimisant les oscillations et les dépassements. Le partage de puissance entre les unités devient plus précis grâce à l'optimisation des paramètres par l'OEP, garantissant une distribution équitable de la charge. La réduction du taux de distorsion harmonique (THD) est obtenue par la génération optimale des références de tension, améliorant ainsi la qualité de l'énergie fournie. Enfin, la meilleure résilience aux perturbations provient de la capacité du RNA à maintenir ses performances même en présence de variations importantes des paramètres du réseau.

La structure complète de la boucle de contrôle est illustrée à la figure 6.8.

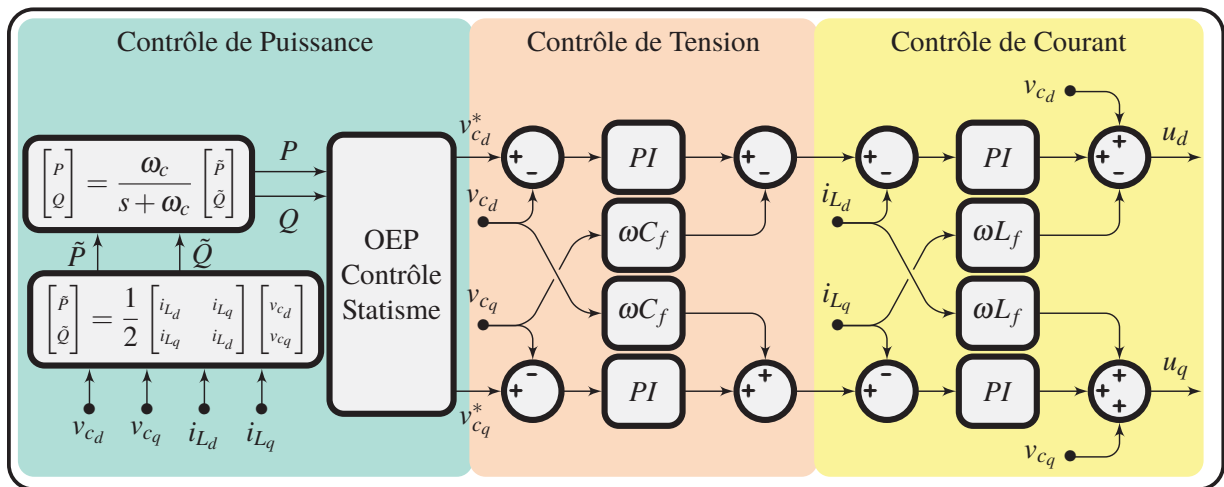


Figure 6.8 Structure détaillée de la boucle de contrôle de partage de puissance

6.2.2.4 Contrôle de statisme par RNA

Le contrôle de statisme basé sur les réseaux de neurones artificiels (CSRNA) constitue le cœur du système proposé. L'architecture du RNA a été spécifiquement conçue pour optimiser la précision et la réactivité du contrôle de statisme.

Le RNA adopte une structure multicouche, comme illustré à la figure 6.9. Les couches sont définies comme suit :

Le RNA adopte une structure multicouche, comme illustré à la figure 6.9.

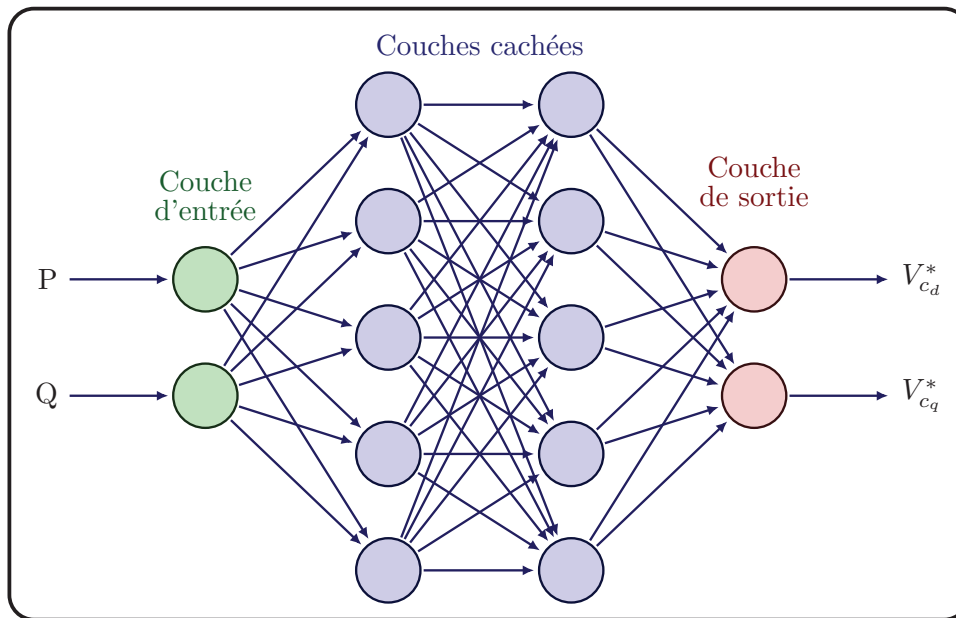


Figure 6.9 Architecture du RNA pour le contrôle de statisme

Les couches sont définies comme suit :

- **Couche d'entrée** : Deux neurones d'entrée recevant les puissances P et Q , avec normalisation des données pour optimiser l'apprentissage.
- **Couche cachée** : Sept neurones avec fonctions d'activation sigmoïdes, capturant les relations non linéaires complexes et optimisant la capacité de généralisation.
- **Couche de sortie** : Deux neurones avec fonctions d'activation ReLU, générant les tensions de référence V_d^* et V_q^* et assurant une sortie positive et non bornée.

Le fonctionnement du CSRNA se déroule en cinq étapes essentielles :

1. **Prétraitement des Données** : Normalisation des puissances mesurées avec mise à l'échelle adaptée aux plages d'activation des neurones, réduisant la sensibilité aux variations d'amplitude.

2. **Propagation Avant** : Transmission des signaux normalisés à travers le réseau avec pondération des connexions entre neurones et application séquentielle couche par couche.
3. **Activation des Couches Cachées** : Application de la fonction sigmoïde introduisant les non-linéarités essentielles pour modéliser les relations complexes entre P et Q .
4. **Génération des Sorties** : Application de la fonction ReLU produisant les tensions de référence V_d^* et V_q^* avec garantie de valeurs positives.
5. **Post-traitement** : Dénormalisation des tensions de référence avec adaptation aux niveaux requis et vérification des contraintes opérationnelles.

L'utilisation du RNA pour le contrôle de statisme offre plusieurs avantages significatifs par rapport aux approches conventionnelles. L'adaptabilité du système se manifeste par un ajustement dynamique aux variations de charge, une adaptation continue aux changements de conditions opérationnelles et une flexibilité remarquable face aux perturbations imprévues. La précision est assurée par une modélisation fine des relations non linéaires entre les puissances et les tensions de référence, permettant un contrôle optimal des puissances active et réactive avec une réduction substantielle des erreurs de régulation. La réactivité du système se traduit par une réponse rapide aux variations, une stabilisation efficace et une minimisation des temps de réponse, paramètres cruciaux pour la stabilité du MR. Enfin, la robustesse du contrôleur se caractérise par une tolérance accrue aux incertitudes paramétriques, une gestion efficace des perturbations et un maintien des performances même dans des conditions opérationnelles variables.

6.2.2.5 Optimisation par essais particuliers

L'OEP joue un rôle fondamental dans la méthodologie proposée en générant un ensemble de données d'entraînement optimal pour le RNA. Cette approche assure que le réseau de neurones dispose d'une base d'apprentissage représentative et de haute qualité.

L'OEP est utilisée pour déterminer les tensions de référence optimales des axes dq qui garantissent la stabilité du système sous diverses conditions de fonctionnement. Le processus d'optimisation vise à minimiser une fonction objectif définie par :

$$\begin{aligned}
\text{Fonction objectif : } f(P, Q) &= \frac{1}{2} \left((P - P^*)^2 + (Q - Q^*)^2 \right) \\
\text{Contraintes : } \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ pu} \leq v_c^* \leq 1.1 \text{ pu} \\ 0.7 \text{ pu} \leq v_{cd}^* \leq v_c^* \\ 0 \text{ V} \leq v_{cq}^* \leq \sqrt{v_c^{*2} - v_{cd}^{*2}} \end{array} \right. & \quad (6.15)
\end{aligned}$$

Dans cette formulation, P et Q représentent les puissances instantanées mesurées, tandis que P^* et Q^* sont les puissances de référence souhaitées. Les contraintes sur les tensions sont établies conformément à la norme IEEE 1514, garantissant le respect des limites opérationnelles du système.

L'algorithme OEP explore l'espace des solutions de manière itérative en suivant une approche bio-inspirée. La position de chaque particule représente une combinaison potentielle de tensions de référence. À chaque itération, les particules ajustent leur position selon leur meilleure expérience personnelle et la meilleure solution globale découverte par l'essaim.

Les résultats de cette optimisation sont illustrés à la figure 6.10, montrant les tensions optimales générées pour les axes d et q .

Les tensions de référence optimales obtenues par l'OEP servent à constituer un ensemble de données d'entraînement complet. Cette base de données couvre un large spectre de conditions opérationnelles, incluant :

$$\begin{aligned}
\text{Plage de puissance active :} & \quad 0 \leq P \leq P_{max} \\
\text{Plage de puissance réactive :} & \quad -Q_{max} \leq Q \leq Q_{max} \\
\text{Variations de charge :} & \quad \text{linéaires et non linéaires} \\
\text{Conditions réseau :} & \quad \text{normales et perturbées}
\end{aligned} \quad (6.16)$$

La validation de cette approche a été effectuée à travers une série de simulations sous MATLAB/SIMULINK, permettant de vérifier la qualité des données générées et leur pertinence pour l'entraînement du RNA.

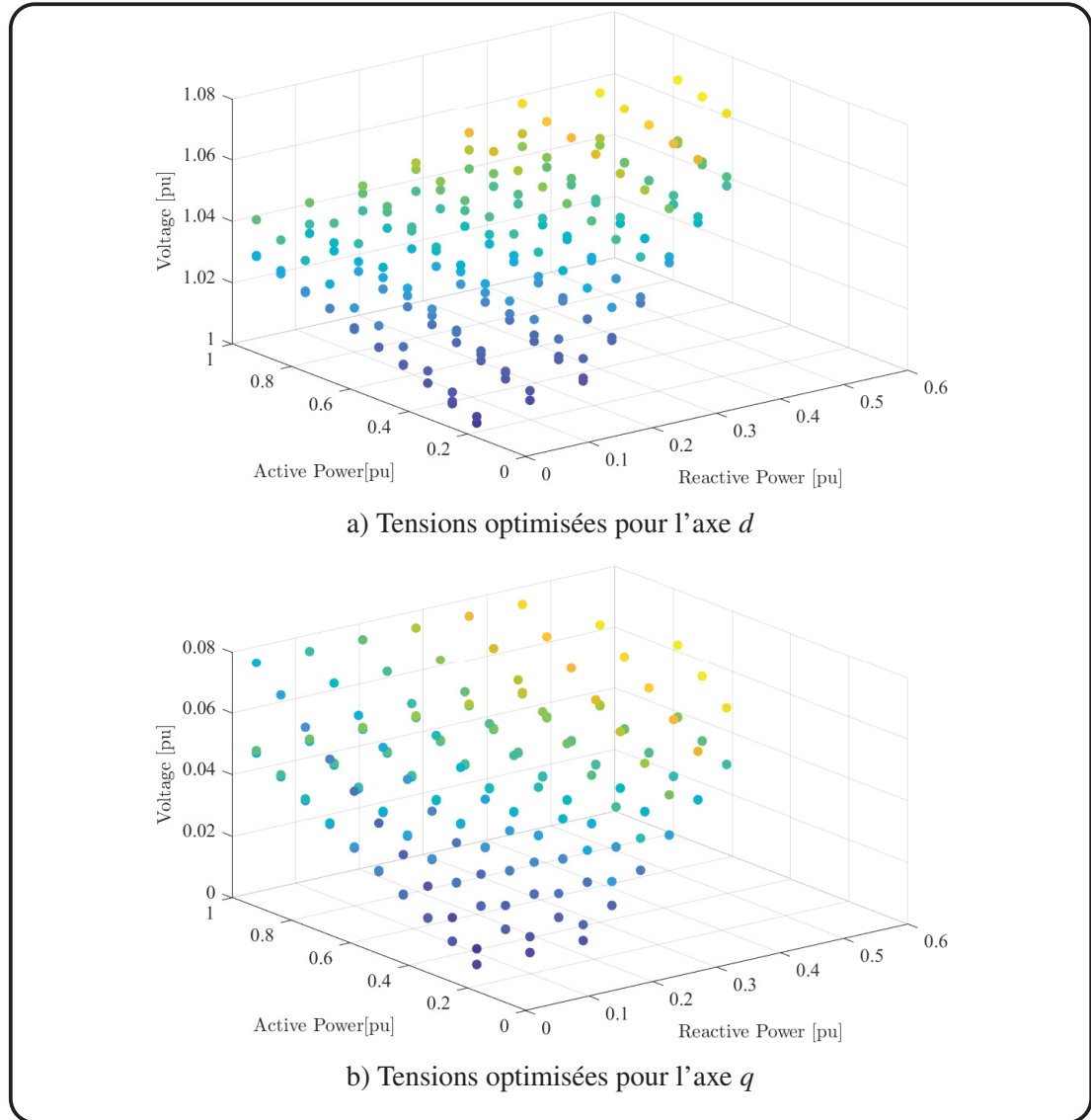


Figure 6.10 Résultats de l'optimisation par OEP pour les tensions de référence

6.2.2.6 Entraînement, test et validation du RNA

La performance et la fiabilité du système de contrôle proposé dépendent fortement de la qualité de l'entraînement du réseau de neurones. Une méthodologie rigoureuse a été développée

pour assurer une évaluation complète des performances du RNA et garantir sa capacité de généralisation.

Un paquet de données contient un ensemble de scénarios de fonctionnement du MR, incluant :

- Les profils de charge (puissance active et réactive)
- Les conditions de génération (disponibilité des sources renouvelables)
- Les paramètres du réseau (tension, fréquence)
- Les valeurs optimales des paramètres de contrôle déterminées par l'OEP

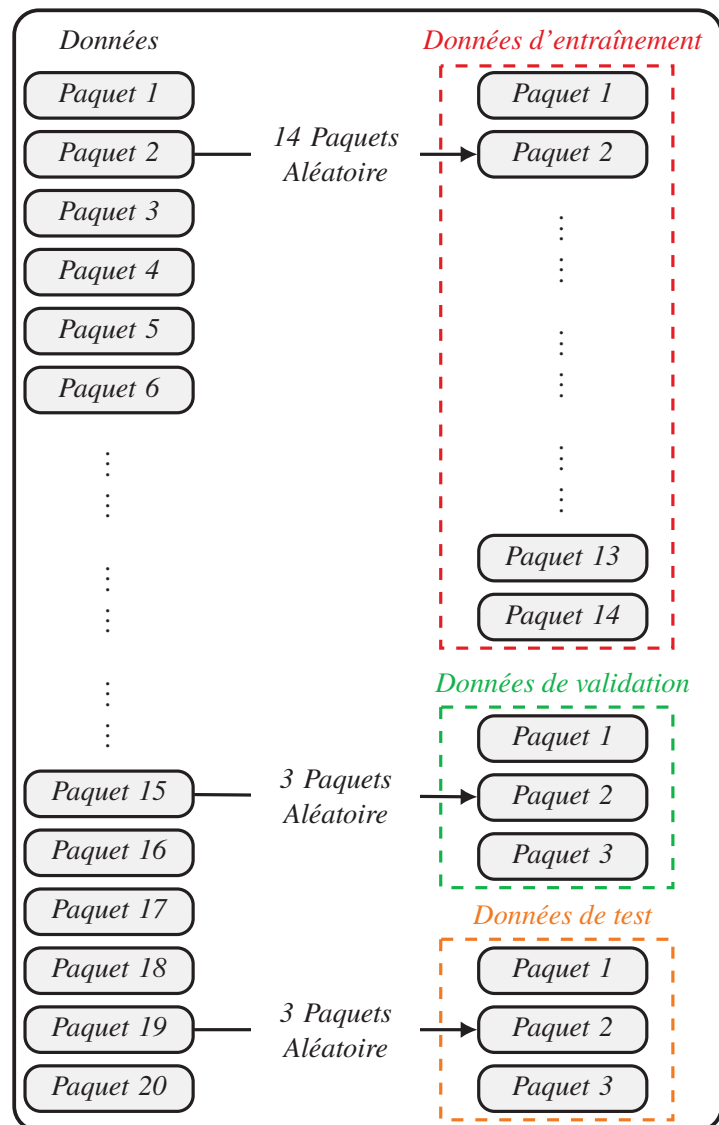


Figure 6.11 Méthodologie de division des données pour l'évaluation du RNA

L'ensemble des données générées par l'OEP est organisé en 20 paquets distincts. Pour assurer une évaluation robuste, dix configurations d'entraînement différentes sont créées, chacune utilisant une répartition spécifique des données comme illustrée à la figure 6.11 :

- 14 paquets pour l'entraînement (70%)
- 3 paquets pour la validation (15%)
- 3 paquets pour les tests (15%)

L'évaluation de chaque configuration utilise l'erreur quadratique moyenne (MSE) comme métrique de performance. Un indice de performance global est calculé pour chaque RNA selon l'équation :

$$\text{indice} = \min \left\{ \frac{\text{best}_{\text{MSE}_{\text{train}}} + \text{best}_{\text{MSE}_{\text{validation}}} + \text{best}_{\text{MSE}_{\text{test}}}}{3} \right\} \quad (6.17)$$

Cette approche permet d'évaluer simultanément :

- La capacité d'apprentissage (MSE d'entraînement)
- L'aptitude à la généralisation (MSE de validation)
- La performance sur des données inédites (MSE de test)

Les performances des différentes configurations sont présentées à la figure 6.12. L'analyse des résultats révèle que le RNA numéro un présente le meilleur équilibre global entre les trois métriques :

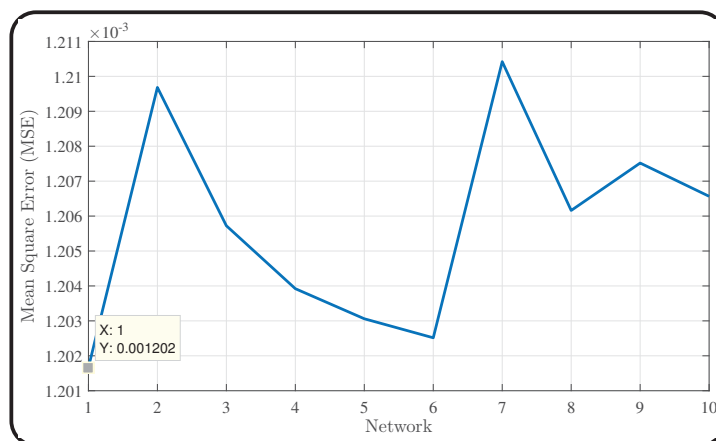


Figure 6.12 Analyse comparative des performances des RNAs

6.3.1 Contrôle de la puissance active

Le contrôle de la puissance active constitue un élément essentiel pour la stabilité fréquentielle du réseau. Selon la norme IEEE 1547, chaque unité de génération distribuée doit intégrer une fonction de contrôle fréquentiel basée sur un mécanisme de statisme.

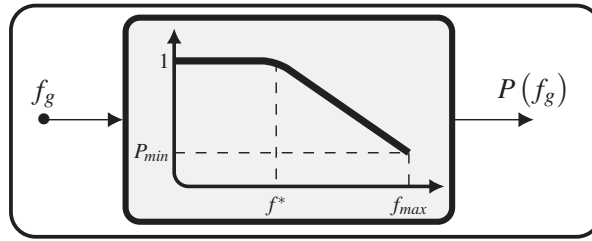


Figure 6.14 Caractéristique du contrôle de puissance active

Le principe fondamental de ce contrôle $P(f)$ établit une relation inverse entre la puissance fournie et la fréquence du réseau. Cette relation est illustrée à la figure 6.14.

La puissance de sortie diminue linéairement lorsque la fréquence dépasse sa valeur de référence f_{ref} . Cette relation peut être exprimée mathématiquement par :

$$P = P_{max} - k_p(f - f_{ref}) \quad (6.18)$$

où k_p représente le coefficient de statisme en fréquence. Les unités de génération maintiennent leur connexion jusqu'à une fréquence maximale f_{max} , tout en modulant leur production de puissance pour contribuer à la stabilité du réseau.

6.3.2 Contrôle de la puissance réactive

Le contrôle de la puissance réactive joue un rôle crucial dans la régulation de tension du réseau. La norme IEEE 1547 prescrit un contrôle $Q(v_g)$ pour optimiser l'intégration des sources distribuées au réseau principal.

La figure 6.15 illustre le mécanisme de contrôle de la puissance réactive :

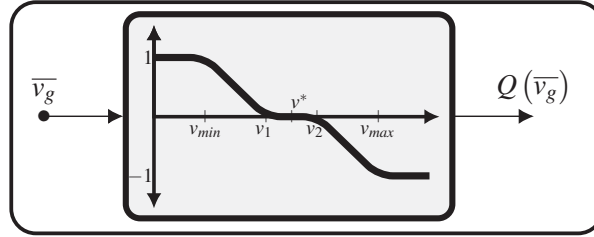


Figure 6.15 Caractéristique du contrôle de puissance réactive

Ce contrôle se caractérise par plusieurs zones de fonctionnement distinctes. Ces zones sont divisées comme suit :

$$Q = \begin{cases} Q_{max} & \text{si } v_g < v_{min} \\ k_q(v_g - v_1) & \text{si } v_{min} \leq v_g < v_1 \\ 0 & \text{si } v_1 \leq v_g \leq v_2 \\ k_q(v_g - v_2) & \text{si } v_2 < v_g \leq v_{max} \\ -Q_{max} & \text{si } v_g > v_{max} \end{cases} \quad (6.19)$$

Cette stratégie de contrôle assure :

- Une injection maximale de puissance réactive lorsque la tension est faible
- Une zone morte entre v_1 et v_2 pour éviter les oscillations
- Une absorption de puissance réactive lors des surtensions
- Une transition progressive entre les différents modes de fonctionnement

L'implémentation coordonnée de ces stratégies de contrôle permet une intégration harmonieuse des sources distribuées au réseau principal, tout en contribuant activement à la stabilité du système électrique global.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, des techniques avancées de contrôle de statisme pour les MRs ont été développées et analysées, en s'appuyant sur les fondements théoriques des réseaux de neurones

artificiels et de l'optimisation par essais particuliers présentés au Chapitre 5. Les développements proposés offrent des solutions innovantes aux défis croissants de l'intégration des sources d'énergie distribuée dans les réseaux électriques modernes.

L'analyse du contrôle de statisme conventionnel a révélé ses limitations, particulièrement dans les réseaux basse tension où le couplage entre puissances active et réactive devient significatif. Ces limitations ont motivé le développement d'une approche hybride combinant RNA et OEP. En exploitant la capacité d'apprentissage des RNA pour modéliser les relations complexes entre puissances et tensions de référence, et l'efficacité de l'OEP pour l'optimisation des paramètres. Cette approche offre une solution adaptative et robuste.

Pour le mode autonome, la méthode proposée tire pleinement parti des caractéristiques complémentaires du RNA et de l'OEP. Le réseau de neurones, structuré selon l'architecture détaillée au Chapitre 5, permet une adaptation dynamique aux variations de charge. L'algorithme OEP, conçu selon les principes d'optimisation collective présentés précédemment, assure une génération optimale des données d'apprentissage, garantissant ainsi la qualité de l'entraînement du RNA.

La validation théorique présentée dans ce chapitre sera complétée par une analyse approfondie des performances du système dans le chapitre suivant. Les simulations permettront d'évaluer quantitativement :

- La stabilité du système face aux variations de charge
- La qualité du partage de puissance entre unités
- La robustesse face aux perturbations réseau
- L'efficacité du contrôle en mode connecté

Ces simulations fourniront une validation complète de l'approche proposée, démontrant comment l'intégration des techniques d'intelligence artificielle permet d'améliorer significativement les performances des MRs modernes.

CHAPITRE 7

RÉSULTATS ET DISCUSSION

7.1 Introduction

Suite aux développements théoriques présentés dans les chapitres précédents concernant les MRs, les GEDs et les techniques de contrôle par statisme, ce chapitre se concentre sur l'évaluation comparative des performances entre le CSC et le CSRNA.

Ce chapitre propose une validation par simulation approfondie à travers l'analyse d'une configuration de MR intégrant quatre GEDs interconnectés en parallèle. L'étude examine spécifiquement deux topologies distinctes : la structure à bus commun et la structure maillée, permettant ainsi d'évaluer les performances du CSRNA dans différentes configurations réseau.

L'objectif principal de ce chapitre réside dans la validation par simulation des avantages théoriques du CSRNA précédemment identifiés, notamment concernant :

- La stabilité globale du système face aux perturbations et aux variations de charge
- L'efficacité du partage de puissance entre les unités GED interconnectées
- La qualité de l'alimentation électrique fournie aux charges sensibles

La méthodologie d'évaluation s'appuie sur des simulations numériques réalisées sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. L'analyse systématique des performances s'articule autour de trois axes d'investigation :

1. L'influence des impédances de ligne :
 - Caractérisation des effets des composantes inductives, résistives et mixtes
 - Quantification de l'impact sur la distribution de puissance
 - Analyse de la stabilité en régime permanent sous différentes configurations
2. Le comportement dynamique face aux variations de charge :
 - Évaluation de la réponse aux charges linéaires et non linéaires
 - Analyse des performances transitoires et des temps de stabilisation
 - Mesure des indices de qualité de l'énergie fournie

3. La flexibilité opérationnelle :

- Étude des séquences de connexion/déconnexion des GED
- Validation de la robustesse du contrôle face aux perturbations
- Caractérisation des temps de réponse et de resynchronisation

Les sections suivantes présentent en détail les configurations techniques retenues ainsi que l'analyse approfondie des résultats de simulation. Cette analyse comparative permet de valider quantitativement les performances du CSRNA dans des conditions opérationnelles représentatives des applications réelles.

7.2 Structure du micro-réseau

L'analyse des performances du contrôleur proposé nécessite une caractérisation précise des configurations topologiques étudiées. Cette section présente les deux architectures fondamentales retenues : la structure à bus commun et la structure maillée, ainsi que leurs paramètres techniques respectifs.

Tableau 7.1 Paramètres techniques du GED

Paramètre	Valeur
Tension du lien CC	2.2pu
Capacité du lien CC	3 mF
Puissance nominale GED	1pu
Fréquence d'échantillonnage	20 kHz
Tension nominale	1pu
Inductance du filtre LC L_f, R_{L_f}	3 mH, 0.25 Ω
Capacité du filtre LC C_f	20 μ F
Fréquence nominale	60 Hz
Pas d'échantillonnage T_s	20 μ s

Les paramètres techniques des unités GED, détaillés dans le tableau 7.1, ont été sélectionnés pour assurer une représentation fidèle des conditions opérationnelles réelles en basse tension. Ces spécifications techniques constituent les éléments fondamentaux pour la validation des performances du contrôleur proposé.

7.2.1 Structure à bus commun

La structure à bus commun représente une configuration classique caractérisée par l'interconnexion parallèle des unités GED à un bus central unique. Cette topologie centralisée présente des caractéristiques spécifiques en termes de distribution d'énergie et de stabilité système. La figure 7.1 illustre le schéma de cette structure.

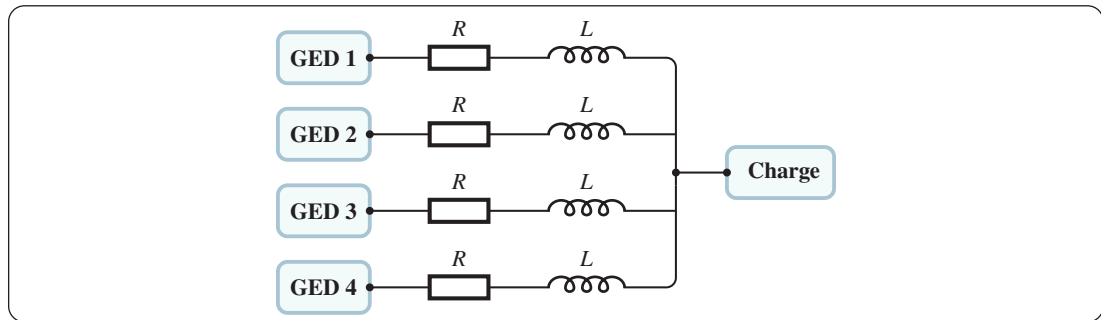


Figure 7.1 Schéma de la structure à bus commun

Les impédances de ligne, modélisées par des composants RL en série, reproduisent les caractéristiques des installations réelles. Le tableau 7.2 présente la paramétrisation retenue pour les différentes configurations d'impédance Bouzid, Alonso & Beral (2025).

Tableau 7.2 Paramètres des impédances pour la structure à bus commun

	Inductive	Résistive	Mixte
R, L	0.046 pu, 0.093 pu	0.046 pu, 0.047 pu	0.046 pu, 0.047 pu

L'analyse des avantages et limitations de cette structure révèle les caractéristiques suivantes :

Avantages :

- Simplicité de conception et d'implémentation
- Gestion centralisée facilitant la coordination des GED
- Maintenance et diagnostics simplifiés

Limitations :

- Sensibilité accrue aux perturbations système
- Contraintes sur l'équilibrage de la distribution de puissance
- Absence de redondance dans les chemins de distribution énergétique
- Vulnérabilité aux défaillances du bus central

7.2.2 Structure maillée

La structure maillée constitue une approche architecturale avancée caractérisée par la multiplicité des interconnexions entre les unités GED. Cette configuration introduit une complexité supplémentaire dans la gestion du réseau, compensée par une flexibilité et une résilience accrues. La figure 7.2 illustre cette structure.

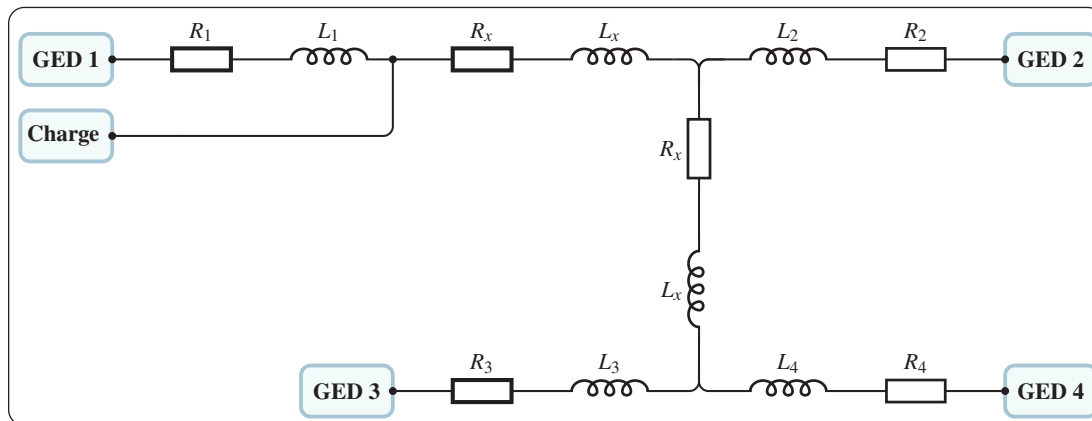


Figure 7.2 Schéma de la structure maillée

Tableau 7.3 Paramètres des impédances pour la structure maillée

	Inductive	Résistive	Mixte
R_1, L_1	0.046 pu, 0.093 pu	0.046 pu, 0.093 pu	0.046 pu, 0.047 pu
R_2, L_2	0.037 pu, 0.082 pu	0.037 pu, 0.082 pu	0.046 pu, 0.040 pu
R_3, L_3	0.037 pu, 0.070 pu	0.037 pu, 0.070 pu	0.037 pu, 0.037 pu
R_4, L_4	0.031 pu, 0.082 pu	0.031 pu, 0.082 pu	0.037 pu, 0.042 pu
R_x, L_x	0.046 pu, 0.009 pu	0.046 pu, 0.009 pu	0.046 pu, 0.005 pu

Le tableau 7.3 présente la paramétrisation des impédances de ligne pour cette configuration Bouzid *et al.* (2025).

L'analyse approfondie de cette structure met en évidence les caractéristiques suivantes :

Avantages :

- Fiabilité accrue grâce à la redondance des chemins de distribution
- Distribution optimisée favorisant l'équilibrage naturel des flux de puissance
- Adaptabilité dynamique aux variations de charge
- Résilience accrue face aux défaillances localisées

Contraintes :

- Complexité algorithmique nécessitant des systèmes de contrôle sophistiqués
- Investissement infrastructurel significatif
- Exigences accrues en termes de synchronisation et de communication
- Maintenance plus complexe des multiples interconnexions

L'analyse comparative des deux structures révèle que la configuration maillée, malgré ses contraintes d'implémentation, représente une solution optimale pour les applications nécessitant une haute disponibilité énergétique et une adaptabilité importante. Cette topologie offre également une meilleure résilience aux défaillances des différents composants du système grâce à ses chemins redondants. Le surcoût d'installation et la complexité accrue se justifient par l'amélioration significative des performances opérationnelles dans les environnements exigeants.

7.3 Types de charges

L'évaluation des performances du système de contrôle nécessite une caractérisation précise des profils de charge. L'analyse par simulation intègre deux catégories distinctes : les charges linéaires et non linéaires. Ceci permet une validation exhaustive du contrôleur dans des conditions opérationnelles représentatives.

7.3.1 Charges linéaires

Les charges linéaires se caractérisent par une relation de proportionnalité directe entre la tension appliquée et le courant résultant. Cette propriété fondamentale implique une reproduction fidèle de la forme d’onde de tension dans le signal de courant. La figure 7.3 illustre la configuration des charges linéaires dans le MR étudié.

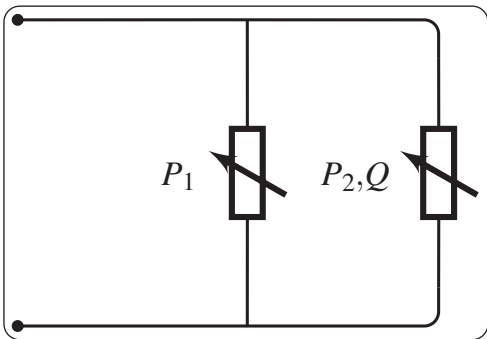


Figure 7.3 Configuration des charges linéaires dans le micro-réseau

Les caractéristiques fonctionnelles des charges linéaires incluent :

- Un comportement prédictible facilitant la modélisation mathématique
- Une signature harmonique minimale limitant les distorsions
- Une stabilité intrinsèque due à leur nature passive

Le protocole de simulation intègre une séquence temporelle définie de deux charges linéaires, dont les paramètres opérationnels sont détaillés dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 Caractéristiques des charges linéaires

Charge	Puissance active	Puissance réactive	Temps de connexion
Charge linéaires 1	1.5 pu	0.0 pu	0 – 6 s
Charge linéaires 2	1.5 pu	1.5 pu	2 – 4 s

Cette configuration permet l’évaluation systématique de trois paramètres critiques :

- La stabilité des paramètres électriques (tension, fréquence)
- L’efficacité du partage de puissance entre les unités
- Les performances dynamiques du système de contrôle

7.3.2 Charges non linéaires

Les charges non linéaires introduisent une relation non proportionnelle entre la tension et le courant, générant des harmoniques qui complexifient la gestion du réseau. Ces charges, principalement constituées de composants d'électronique de puissance tels que des redresseurs à diodes avec charge résistive, représentent une proportion croissante des installations modernes. La figure 7.4 illustre la configuration des charges non linéaires dans le MR étudié.

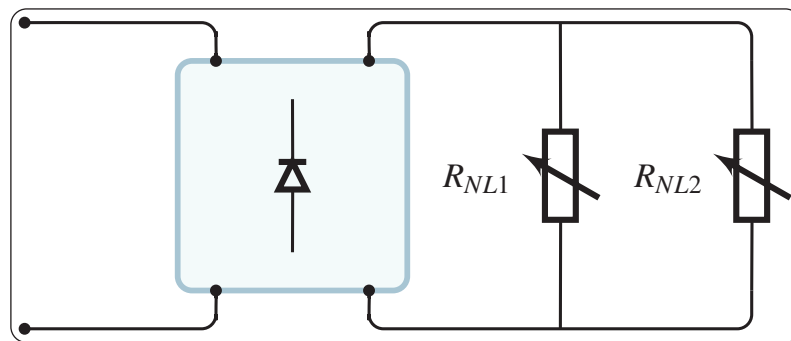


Figure 7.4 Configuration des charges non linéaires dans le micro-réseau

L'impact système des charges non linéaires se manifeste à plusieurs niveaux :

- Distorsion harmonique affectant la qualité de l'onde de tension
- Complexité analytique nécessitant une modélisation mathématique sophistiquée
- Sollicitation thermique accrue des équipements électriques
- Perturbation potentielle des systèmes de mesure et de protection

Le protocole de simulation intègre deux charges non linéaires constituées de redresseurs monophasés à pont de diodes alimentant des charges résistives. Les caractéristiques de ces charges sont présentées dans le tableau 7.5.

Tableau 7.5 Caractéristiques des charges non linéaires

Charge	Résistance	Temps de connexion
Charge non linéaire 1	0.75 pu	0 – 6 s
Charge non linéaire 2	1.25 pu	2 – 4 s

L'évaluation des performances du contrôleur face aux charges non linéaires s'articule autour de trois axes critiques :

1. Qualité de l'énergie fournie :

- Analyse des formes d'onde de tension
- Mesure des déviations par rapport aux valeurs nominales
- Évaluation de la stabilité en régime permanent

2. Atténuation des harmoniques :

- Quantification du TDH
- Analyse spectrale des composantes harmoniques
- Évaluation de l'efficacité du filtrage

3. Stabilité tension-fréquence :

- Mesure des variations dynamiques
- Analyse des temps de réponse
- Évaluation de la robustesse du contrôle

Cette caractérisation approfondie des charges permet une évaluation rigoureuse de la capacité du contrôleur à maintenir la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique dans des conditions variées de fonctionnement. L'utilisation exclusive de charges non linéaires offre un cadre de simulation exigeant, représentatif des conditions réelles d'exploitation des MRs modernes où l'électronique de puissance est omniprésente.

7.4 Test de connexion/déconnexion des générateurs

L'analyse de la résilience et de la flexibilité opérationnelle du MR repose sur l'évaluation systématique des transitions dynamiques induites par la connexion et la déconnexion des unités GED. Ces transitions constituent un indicateur fondamental de la robustesse du système et de sa capacité à maintenir une alimentation stable face aux perturbations transitoires majeures.

Le protocole de simulation s'articule autour de trois phases distinctes, chacune correspondant à un état spécifique du système. La phase initiale, s'étendant de 0 à 2 secondes, établit le régime

permanent avec l'ensemble des GED connectés. La phase de déconnexion, entre 2 et 4 secondes, introduit une perturbation majeure par la déconnexion du GED 4. Enfin, la phase de reconnexion, de 4 à 7 secondes, permet d'évaluer la capacité de resynchronisation du système. Cette séquence temporelle, détaillée dans le tableau 7.6, permet une caractérisation complète de la réponse du système aux variations topologiques.

Tableau 7.6 Protocole de test pour la connexion/déconnexion des générateurs

Phase	Instant	État	Objectif d'analyse
Initiale	0 – 2 s	Tous les GED connectés	Régime permanent initial
Déconnexion	2 – 4 s	GED 4 déconnecté	Réponse à une perturbation
Reconnexion	4 – 7 s	Tous les GED reconnectés	Capacité de resynchronisation

L'évaluation des performances s'effectue selon trois axes d'analyse fondamentaux.

Le premier concerne la stabilité du système. Celle-ci est caractérisée par le maintien des paramètres tension-fréquence dans les plages normatives, la quantification des déviations transitoires et l'analyse des temps de retour aux valeurs nominales.

Le second axe examine la réponse dynamique du système. Il inclut la caractérisation des oscillations post-déconnexion, l'analyse des transitoires de reconnexion et l'évaluation des temps de stabilisation.

Le troisième axe porte sur l'équilibre de puissance. Il englobe l'analyse de la redistribution automatique des charges, l'évaluation du partage de puissance active et la mesure de la répartition de puissance réactive.

La méthodologie d'analyse intègre l'évaluation d'indicateurs de performance spécifiques, regroupés en trois catégories. Les indicateurs statiques quantifient les écarts de tension en régime permanent, les déviations de fréquence stabilisées et la distribution finale des puissances. Les indicateurs dynamiques caractérisent les amplitudes maximales des oscillations, les temps de réponse du système et les caractéristiques d'amortissement. Les critères de qualité évaluent le TDH, la stabilité des formes d'onde et l'équilibre des phases.

Cette approche méthodologique permet une caractérisation exhaustive de la robustesse du système face aux perturbations majeures. L'analyse des résultats valide la capacité du contrôleur à maintenir la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique dans des conditions opérationnelles variables, tout en assurant une transition contrôlée entre les différents états du système. La méthodologie développée permet également d'identifier les points critiques nécessitant une attention particulière lors de la conception et du dimensionnement des systèmes de contrôle pour les MRs intelligents.

Les résultats de ces tests constituent une base solide pour l'optimisation des stratégies de contrôle et la validation des performances du système dans des conditions réelles d'exploitation. Cette caractérisation approfondie des transitions dynamiques s'avère essentielle pour garantir la fiabilité et la robustesse des MRs face aux perturbations structurelles.

7.5 Résultats et discussion

Cette section présente l'analyse comparative des performances du CSRNA et du CSC à travers des simulations numériques réalisées sous MATLAB/SIMULINK. L'évaluation couvre trois axes principaux : la topologie du MR (bus commun et maillée), le type de charges (linéaires et non linéaires) et la réponse dynamique lors des connexions/déconnexions de GED.

7.5.1 Structure à bus commun

7.5.1.1 Comportement du système avec charges linéaires

L'analyse comparative réalisée entre le CSC et le CSRNA dans la configuration à bus commun avec charges linéaires révèle des différences significatives dans la gestion des paramètres électriques fondamentaux. Les résultats obtenus sous différentes conditions d'impédance de ligne démontrent la supériorité du CSRNA dans plusieurs aspects critiques du fonctionnement du MR.

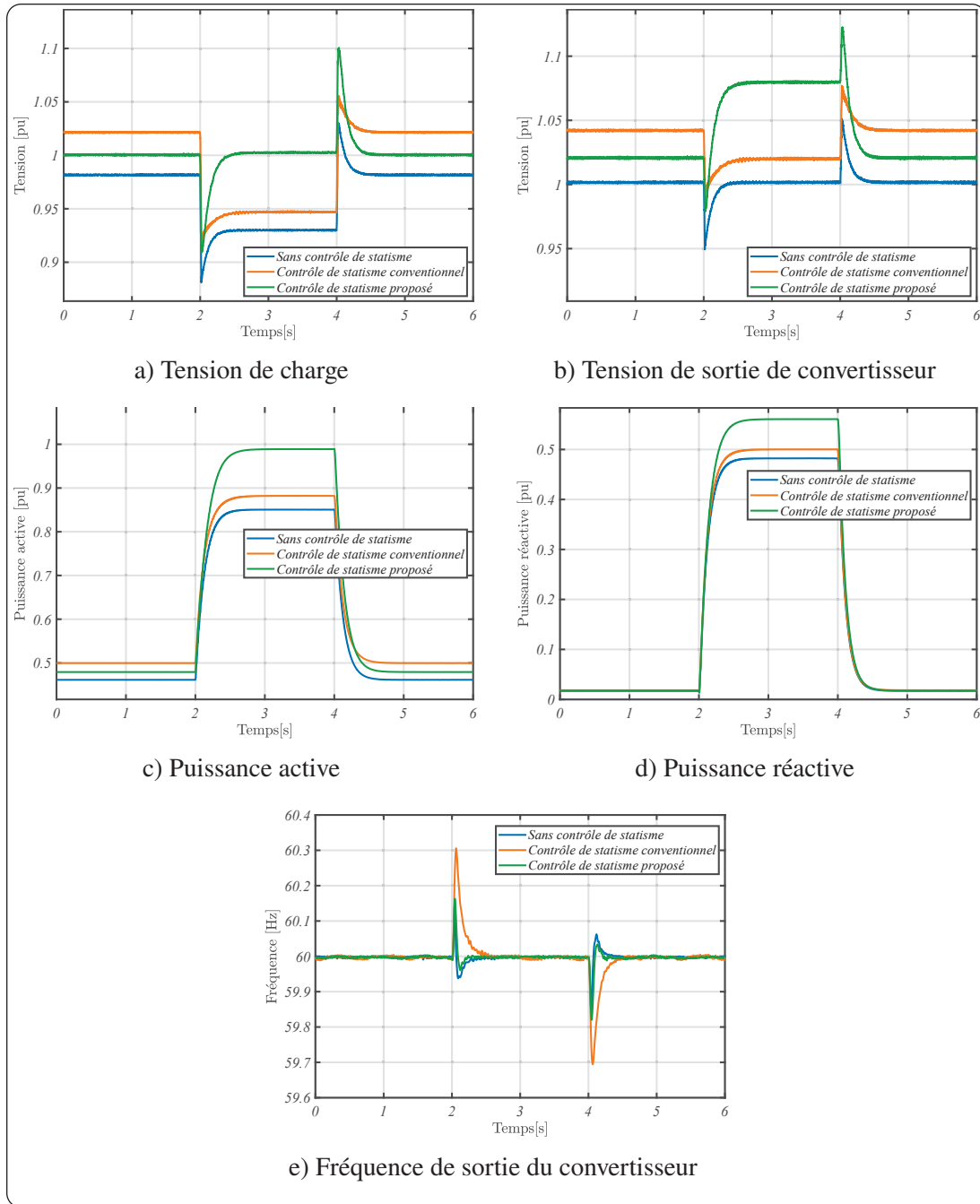


Figure 7.5 Résultats de la simulation pour une ligne inductive

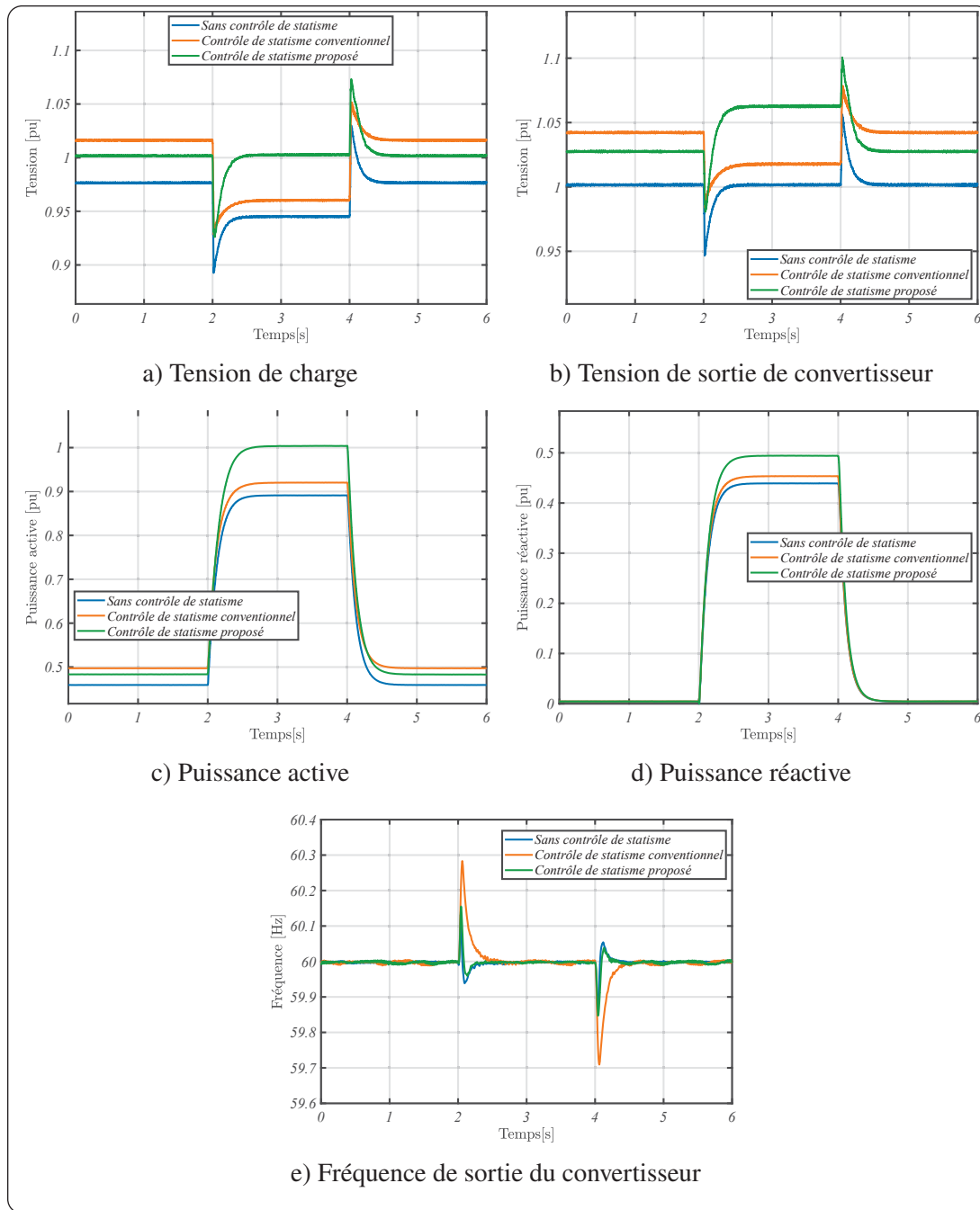


Figure 7.6 Résultats de la simulation pour une ligne résistive

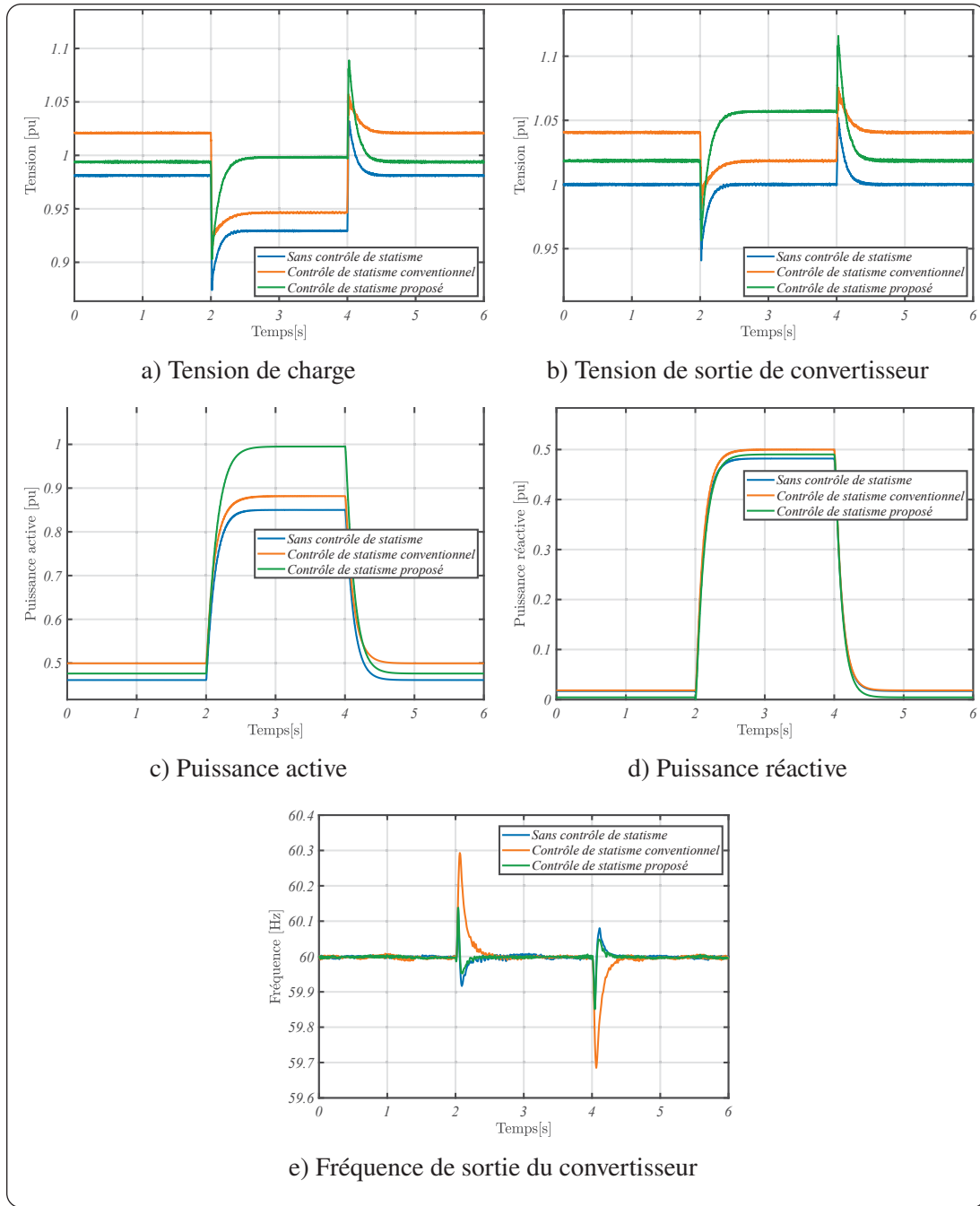


Figure 7.7 Résultats de la simulation pour une ligne mixte

L'analyse des puissances active et réactive, illustrée dans les figures 7.5c, 7.5d, 7.6c, 7.6d, 7.7c et 7.7d, met en évidence une amélioration notable de la précision du partage de puissance avec la méthode CSRNA. Bien que les deux méthodes assurent une répartition approximative de la charge entre les unités, le CSRNA démontre une précision supérieure avec une erreur de partage inférieure à 0.5 %, comparativement à des écarts atteignant 7 % pour le CSC.

Cette amélioration significative résulte de la capacité du CSRNA à ajuster dynamiquement ses paramètres de contrôle en fonction des variations d'impédance de ligne et des conditions de charge.

Le contrôle de la tension de charge, présentée dans les figures 7.5a, 7.6a et 7.7a, démontre la capacité remarquable du CSRNA à maintenir l'amplitude dans une plage restreinte de ± 0.05 % autour de la valeur nominale de 1.0 pu. En comparaison, la méthode CSC présente des écarts plus importants atteignant ± 4.5 %. Cette amélioration significative du contrôle de tension se traduit directement par une meilleure qualité de l'alimentation électrique fournie aux charges.

L'analyse de la stabilité fréquentielle, illustrée dans les figures 7.5e, 7.6e et 7.7e, met en évidence la supériorité du CSRNA avec une déviation moyenne limitée à 0.15 Hz par rapport à la valeur nominale de 60 Hz, comparativement à des écarts atteignant 0.4 Hz pour le CSC. Cette stabilité fréquentielle accrue s'avère essentielle pour le maintien de la synchronisation du système et la protection des équipements sensibles.

L'ajustement dynamique des références de tension sur les axes dq , présenté dans les figures 7.5b, 7.6b et 7.7b, révèle la capacité supérieure du CSRNA à s'adapter aux variations de charge. Cette adaptabilité se manifeste par une réponse plus rapide et plus précise aux perturbations, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité globale du MR.

7.5.1.2 Comportement du système avec charges non-linéaires

L'évaluation des performances en présence de charges non linéaires révèle des différences significatives dans la gestion des distorsions harmoniques et la stabilité du système. Les résultats démontrent la capacité du CSRNA à maintenir une haute qualité de l'alimentation électrique dans des conditions de charge complexes. Les charges non linéaires utilisées sont constituées de redresseurs monophasés à pont de diodes alimentant des charges résistives de 0.6 pu et 1.25 pu.

L'analyse de la tension de charge, illustrée dans la figure 7.8, démontre que le CSRNA maintient systématiquement la tension proche de la valeur nominale de 1.0 pu, avec des écarts inférieurs à 0.18 %. La méthode CSC, en revanche, présente des chutes de tension significatives, notamment dans le scénario de charges mixtes où l'amplitude chute à 0.94 pu, soit une déviation de 6 %. Cette stabilité accrue de la tension s'avère cruciale pour la protection des équipements sensibles.

Il est également intéressant de noter que lors de la connexion de la charge non linéaire, la puissance fournie par le CSRNA est plus élevée que celle fournie par le CSC comme illustrée dans les figures 7.9a-7.9d, 7.12a-7.12d et 7.15a-7.15d. Cette différence s'explique par la capacité du CSRNA à mieux s'adapter aux variations de charge et à fournir la puissance nécessaire tout en maintenant un TDH inférieur.

Le comportement dynamique du système, illustré dans les figures 7.9e à 7.9h, 7.12e à 7.12h et 7.15e à 7.15h, démontre la supériorité du CSRNA dans la gestion des transitions. Le contrôleur assure une meilleure stabilisation de la tension et de la fréquence lors des variations de charge, caractérisée par une réduction significative des oscillations transitoires et un temps de réponse optimisé.

Les performances en régime établi, synthétisées dans les tableaux 7.7a et 7.7b, confirment la supériorité du CSRNA. L'analyse des résultats révèle une amélioration systématique des performances pour l'ensemble des configurations testées, notamment :

Tableau 7.7 Résumé des résultats du TDH dans une structure à bus commun

(a) TDH du courant				
Type de ligne	Contrôle	Charge	Fond. [pu]	TDH [%]
Inductive	CSC	NL1	0.52	2.33
		NL1 + NL2	0.78	2.12
	CSRNA	NL1	0.50	2.29
		NL1 + NL2	0.70	1.99
Résistive	CSC	NL1	0.51	4.01
		NL1 + NL2	0.75	3.18
	CSRNA	NL1	0.51	4.01
		NL1 + NL2	0.76	3.10
Mixte	CSC	NL1	0.52	3.24
		NL1 + NL2	0.78	3.03
	CSRNA	NL1	0.51	3.00
		NL1 + NL2	0.70	2.67

(b) TDH de la tension				
Type de ligne	Contrôle	Charge	Fond. [pu]	TDH [%]
Inductive	CSC	NL1	1.02	2.33
		NL1 + NL2	1.00	2.12
	CSRNA	NL1	1.00	2.29
		NL1 + NL2	1.00	1.99
Résistive	CSC	NL1	1.02	4.01
		NL1 + NL2	0.99	3.18
	CSRNA	NL1	1.00	4.01
		NL1 + NL2	1.00	3.10
Mixte	CSC	NL1	1.02	3.24
		NL1 + NL2	1.00	3.03
	CSRNA	NL1	1.00	3.00
		NL1 + NL2	1.00	2.67

L'analyse spectrale des courants et tensions, présentée dans les figures 7.10 à 7.17, révèle que le CSRNA améliore systématiquement le TDH par rapport au CSC. Ces améliorations, bien que modérées dans certains cas, sont cohérentes avec la nature du contrôleur proposé qui optimise principalement les performances dynamiques. Pour la configuration inductive avec les deux charges non linéaires connectées, le TDH du courant passe de 2.12 % (CSC) à 1.99 % (CSRNA),

soit une réduction de 6.1 %. Cette amélioration est encore plus marquée en configuration mixte, où le TDH passe de 3.03 % à 2.67 %, soit une réduction de 11.9 %.

Cependant, l'analyse détaillée du tableau 7.7a révèle des différences significatives au niveau de l'amplitude du courant fondamental. En configuration inductive avec les deux charges connectées, le courant fondamental passe de 0.78 pu (CSC) à 0.70 pu (CSRNA), ce qui indique une meilleure efficacité du transfert de puissance avec le CSRNA malgré un courant légèrement inférieur. En configuration mixte, cette tendance se confirme avec une réduction similaire du courant de 0.78 pu à 0.70 pu tout en maintenant un TDH significativement plus faible. Cette réduction du courant efficace, combinée à l'amélioration du contenu harmonique, résulte en une meilleure qualité de l'énergie fournie aux charges.

L'analyse du tableau 7.7b révèle que le CSRNA démontre une supériorité remarquable dans le maintien de l'amplitude de tension. Cette caractéristique est particulièrement critique pour la protection des équipements sensibles et la qualité de service.

Le contrôleur CSC présente une légère surtension lors du fonctionnement avec une seule charge non linéaire. Par exemple, en configuration inductive, la tension fondamentale atteint 1.02 pu, soit un écart de 2 % par rapport à la valeur nominale de 1.0 pu. En configuration résistive avec les deux charges connectées, le CSC présente une légère chute de tension à 0.99 pu, soit une déviation de 1 %. Ces variations de tension, bien que modérées, peuvent affecter le fonctionnement optimal des équipements connectés sur le long terme.

En contraste, le CSRNA maintient une régulation de tension exceptionnelle. L'amplitude de la tension fondamentale reste remarquablement stable à 1.00 pu, indépendamment du nombre de charges connectées. Par exemple, en configuration inductive, la tension reste constante à 1.00 pu que ce soit avec une ou deux charges non linéaires - une variation négligeable. Cette stabilité se maintient pour toutes les configurations d'impédance, avec le CSRNA maintenant systématiquement la tension à 1.00 pu même en configuration résistive où le CSC présente une chute à 0.99 pu.

Il est intéressant de noter que cette régulation supérieure de l'amplitude s'accompagne également d'une réduction du TDH de tension avec le CSRNA. Par exemple, en configuration mixte avec une seule charge non linéaire, le TDH de tension passe de 3.24 % (CSC) à 3.00 % (CSRNA), soit une réduction de 7.4 %. Avec les deux charges connectées, cette amélioration se maintient avec un TDH passant de 3.03 % à 2.67 %. Cette amélioration simultanée de la régulation d'amplitude et du contenu harmonique démontre l'efficacité globale du CSRNA.

Cette analyse confirme que le CSRNA privilégie la stabilité de l'amplitude de tension - paramètre crucial pour la qualité de l'alimentation - tout en réduisant le TDH. Cette approche est particulièrement adaptée aux MRs modernes où la protection des charges sensibles et le maintien de la qualité de service sont prioritaires.

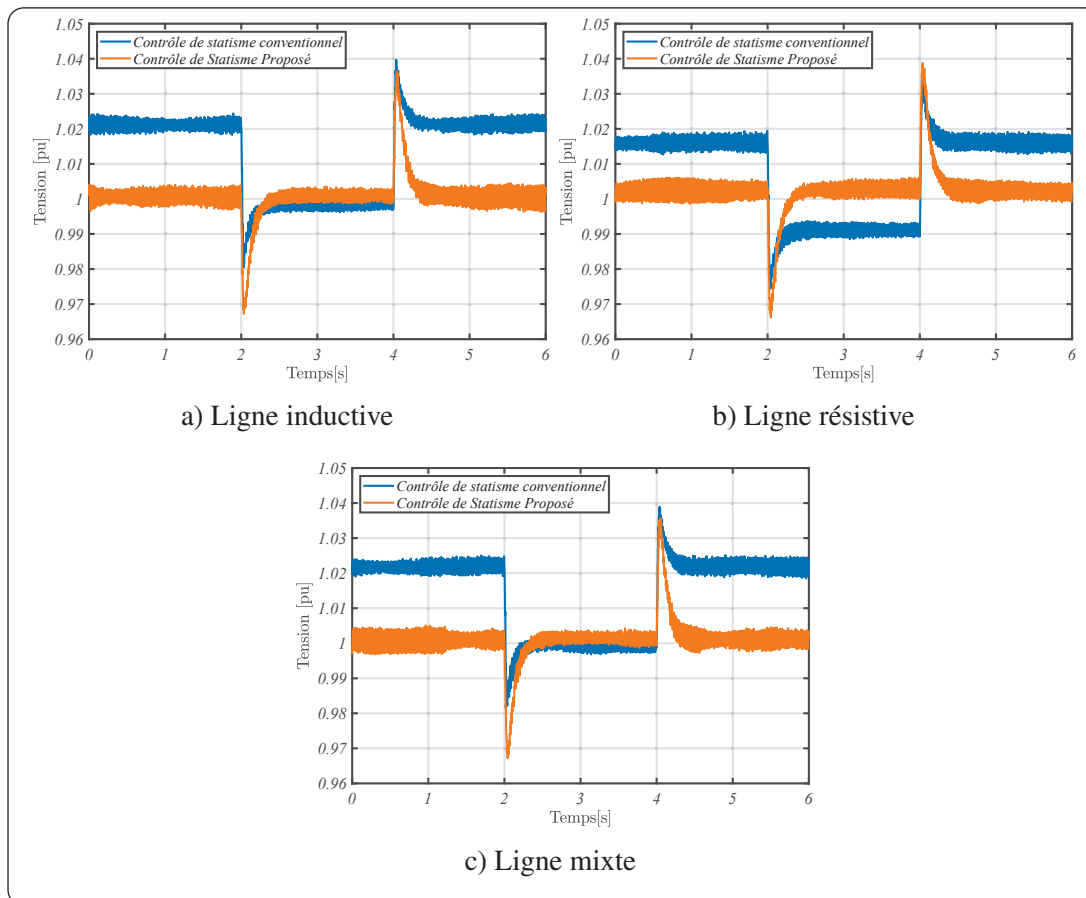


Figure 7.8 Résultats de la simulation de la tension aux borne de la charge non-linéaire pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)

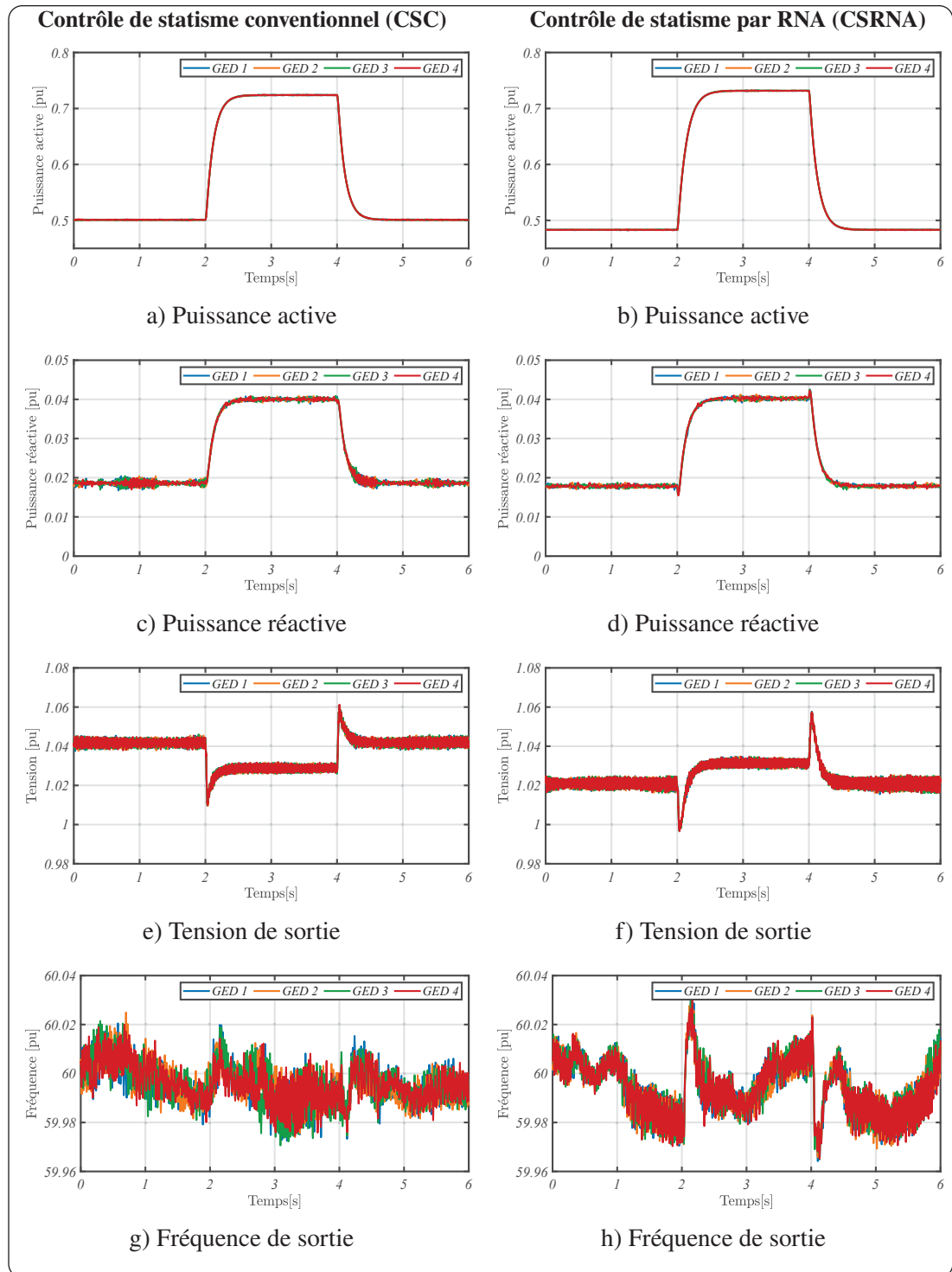


Figure 7.9 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

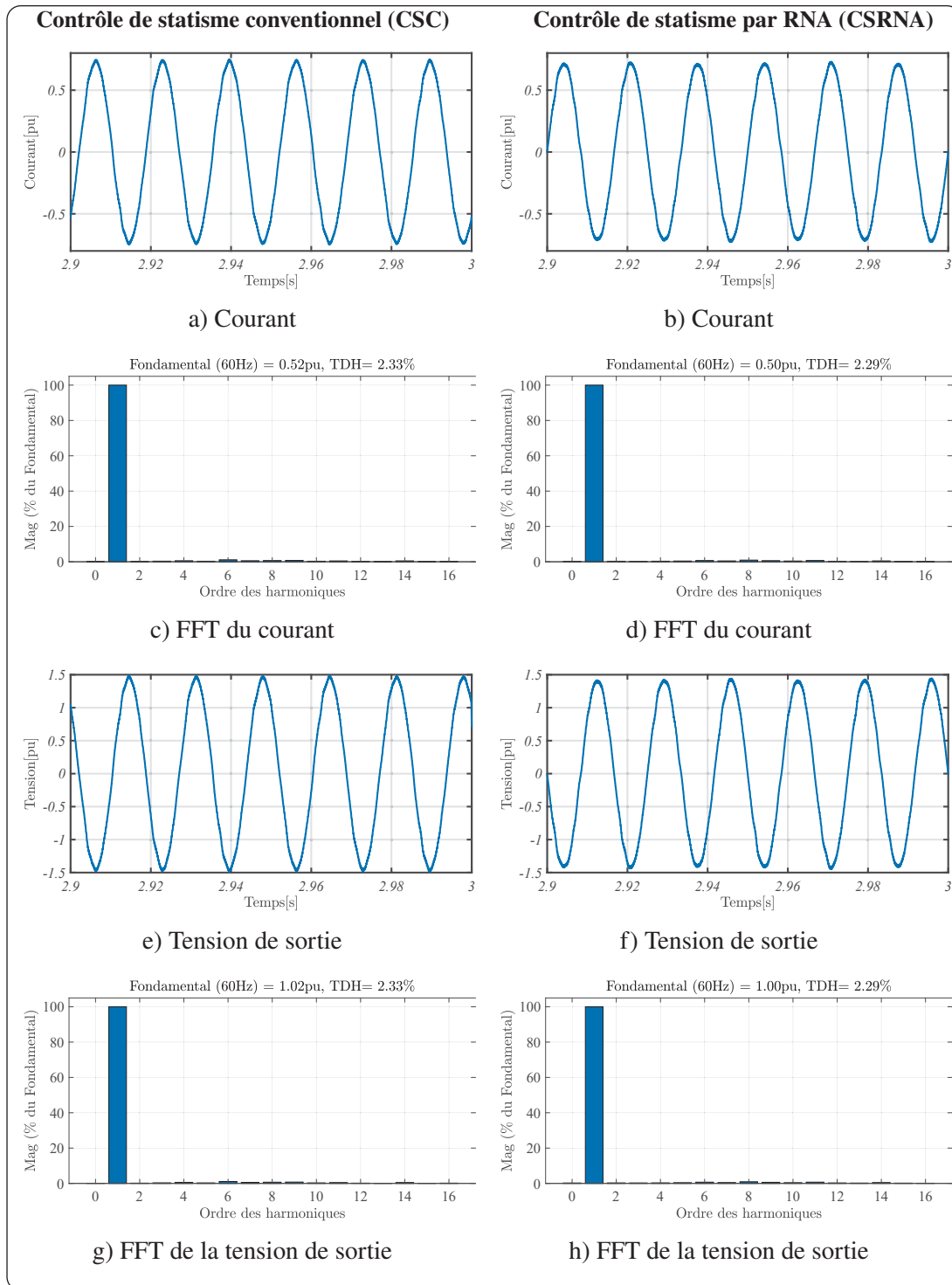


Figure 7.10 Comparaison entre le contrôle par statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

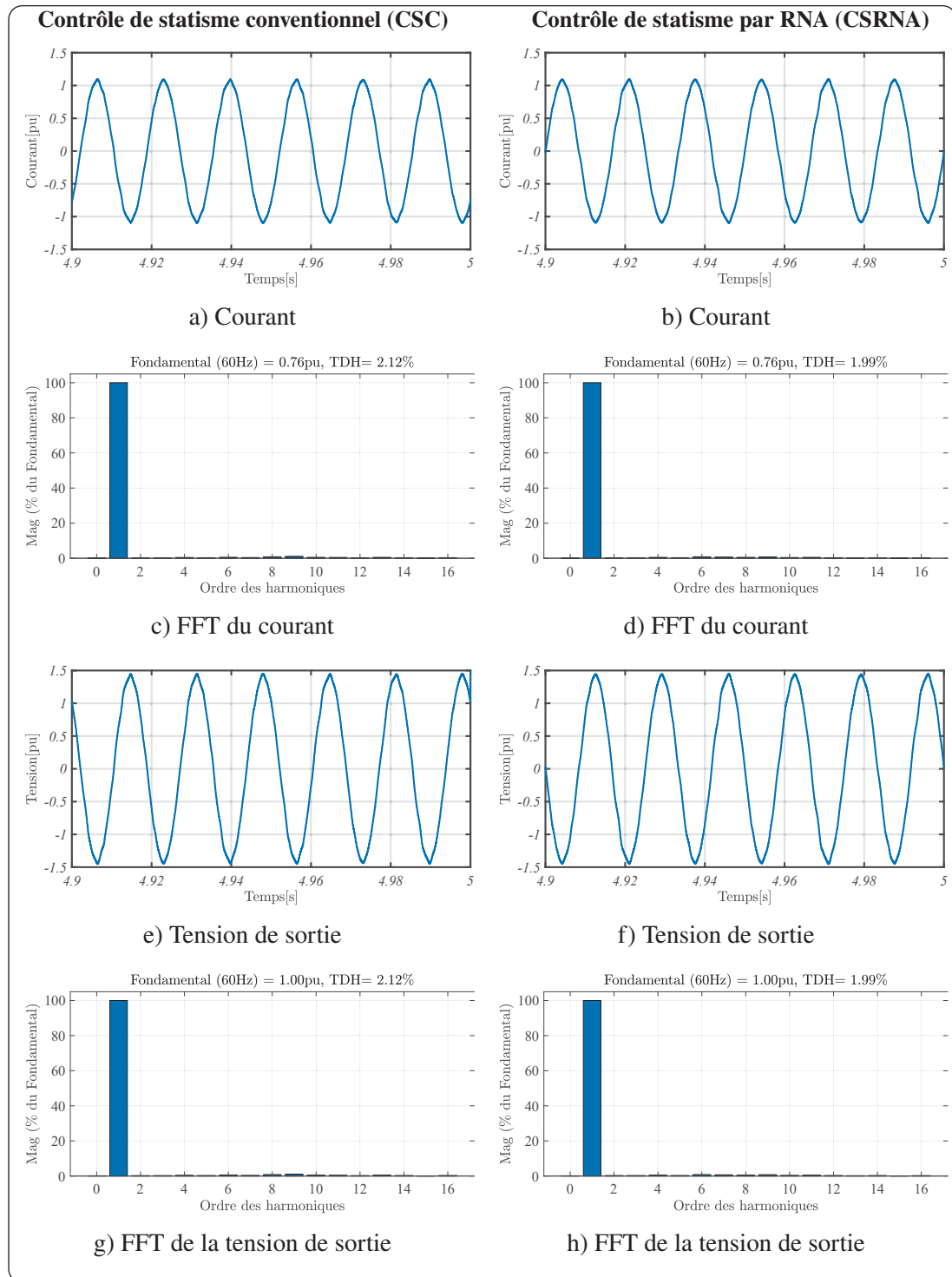


Figure 7.11 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

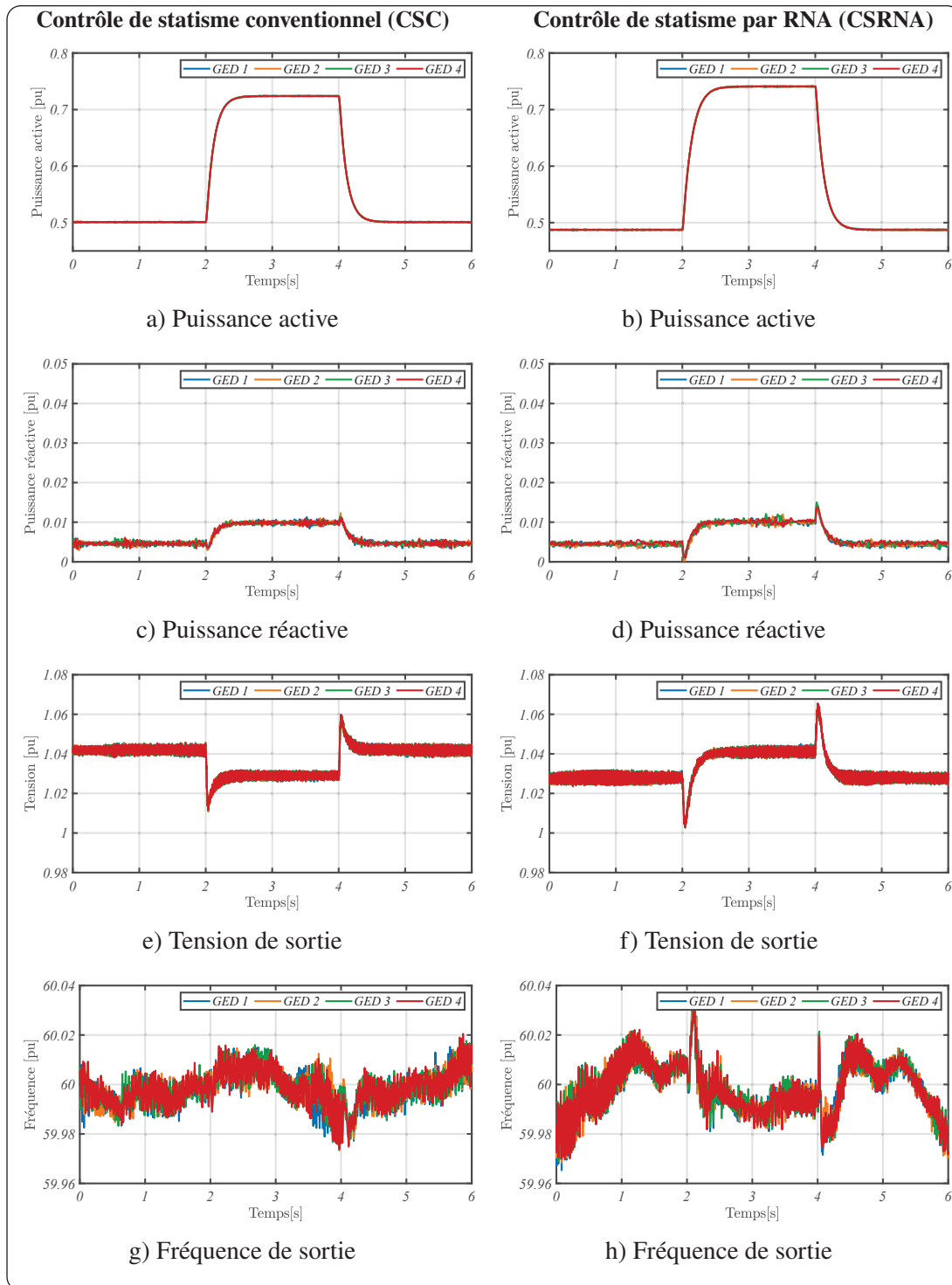


Figure 7.12 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

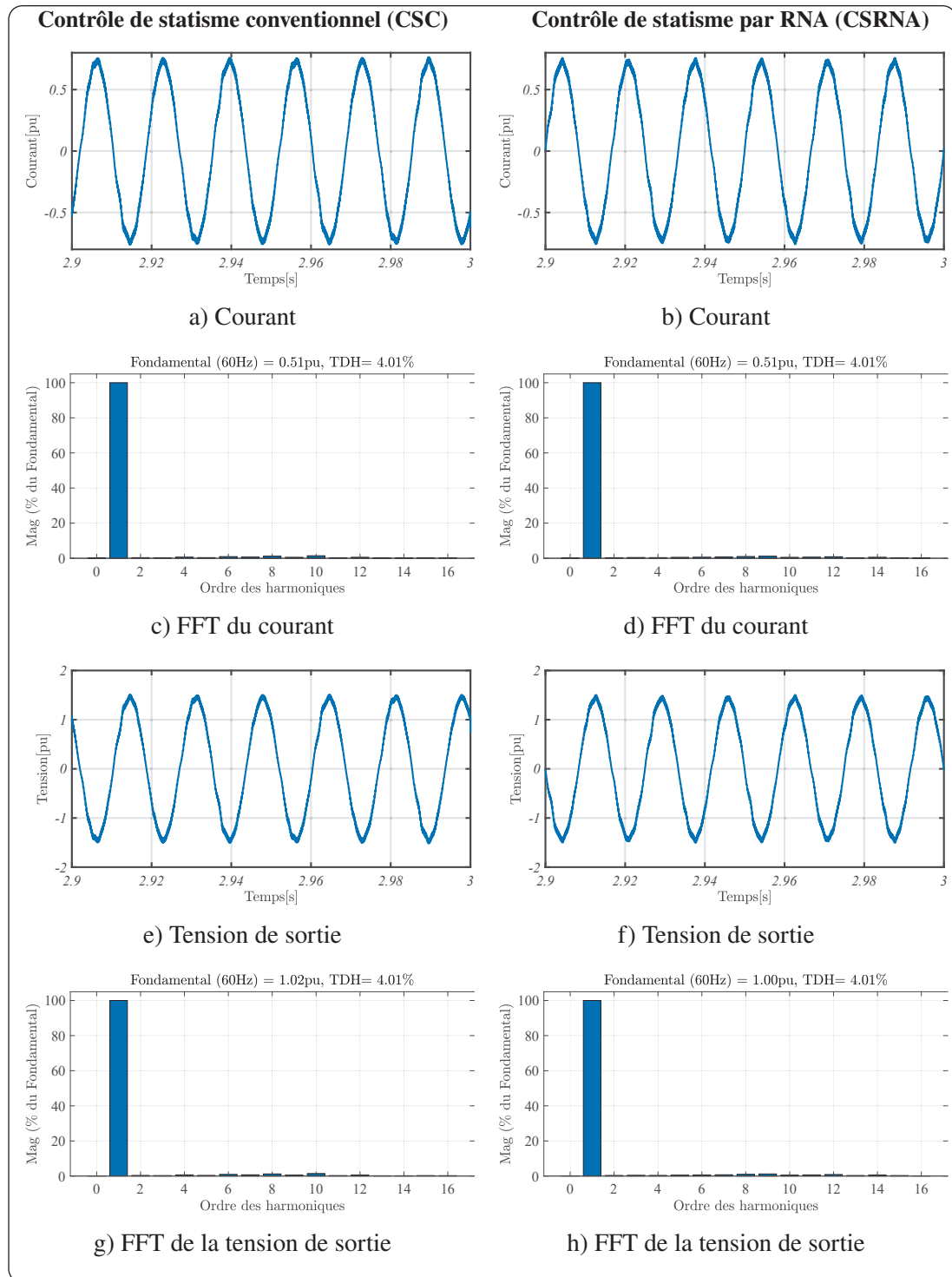


Figure 7.13 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

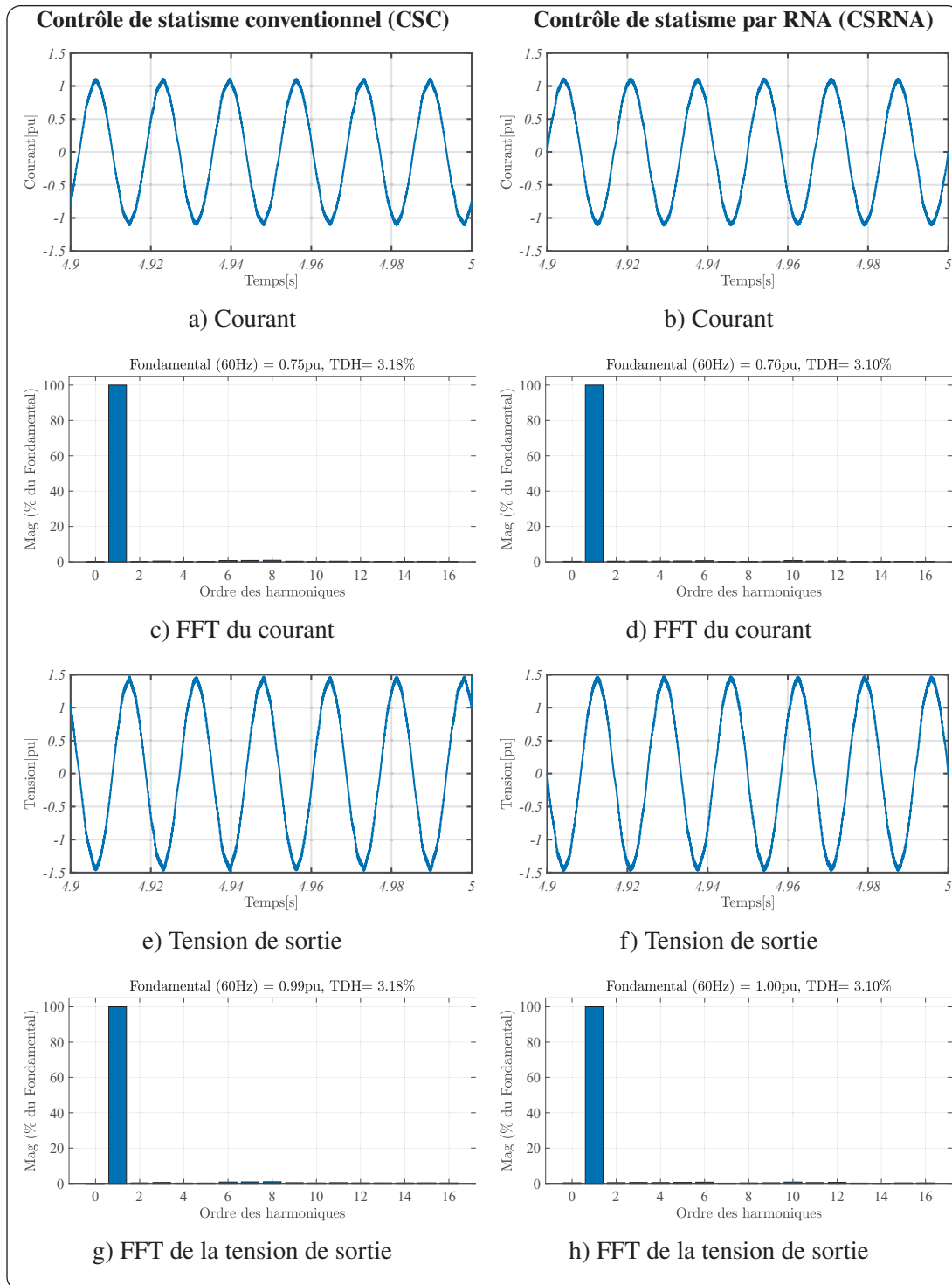


Figure 7.14 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

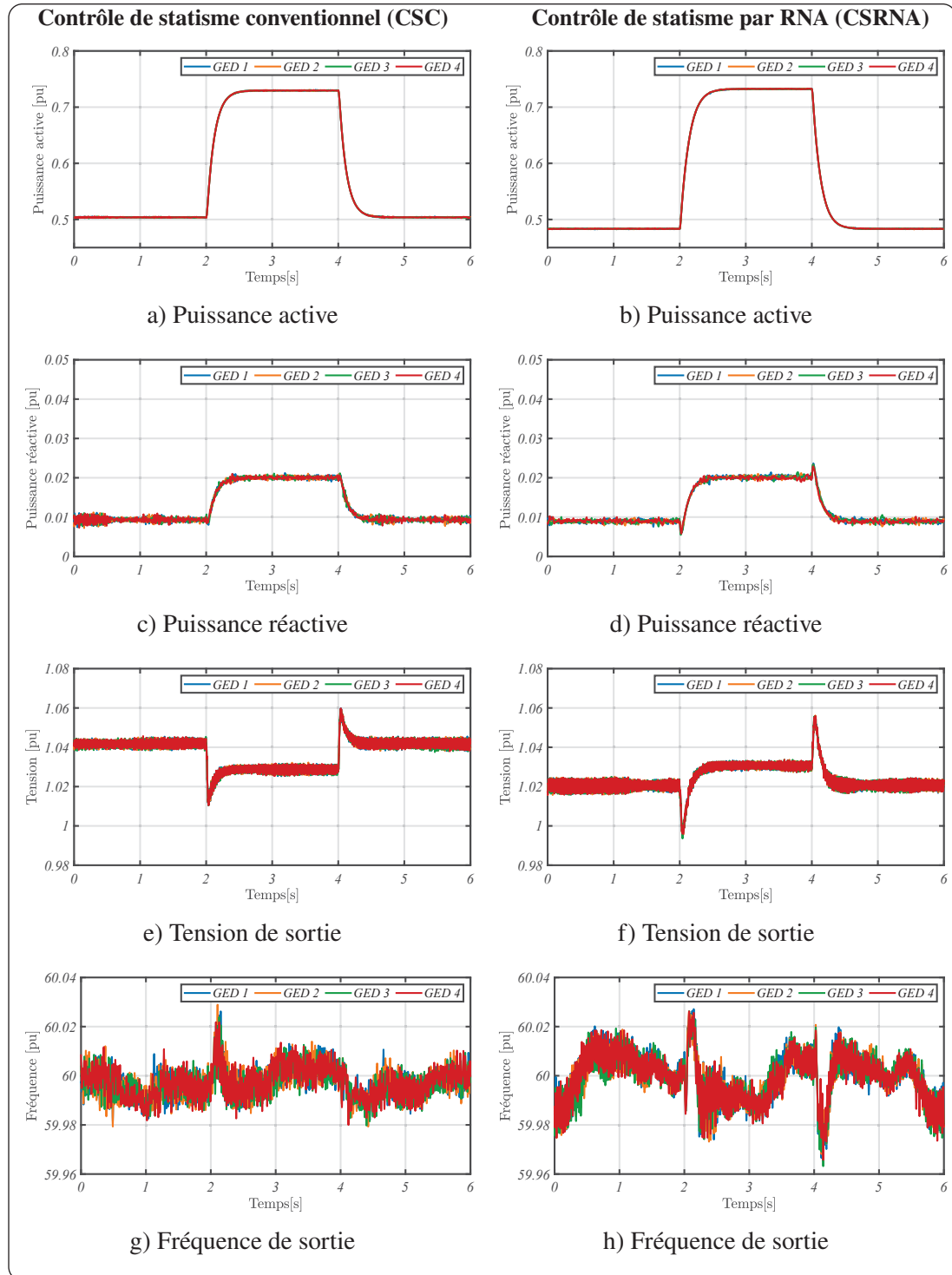


Figure 7.15 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

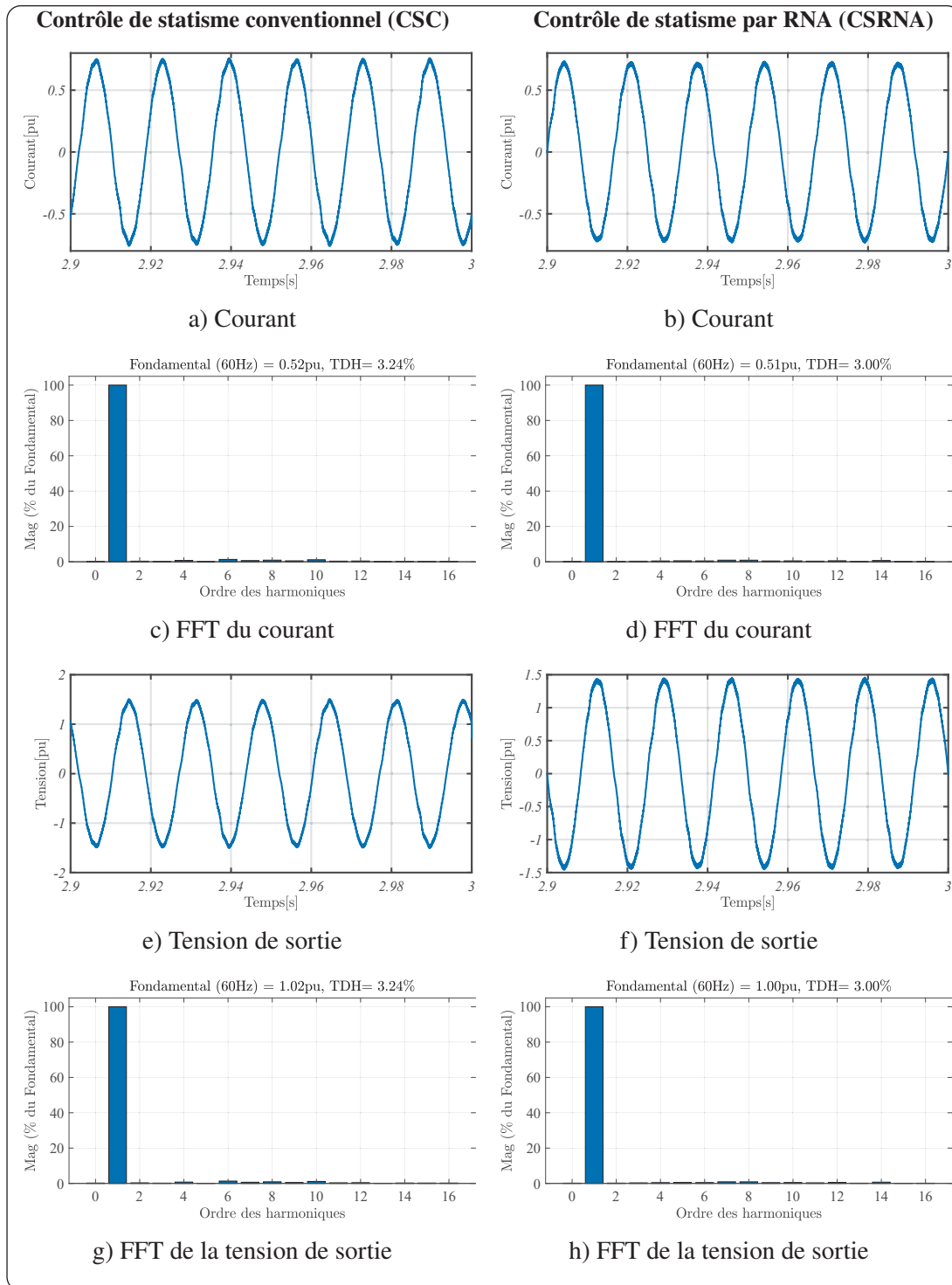


Figure 7.16 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

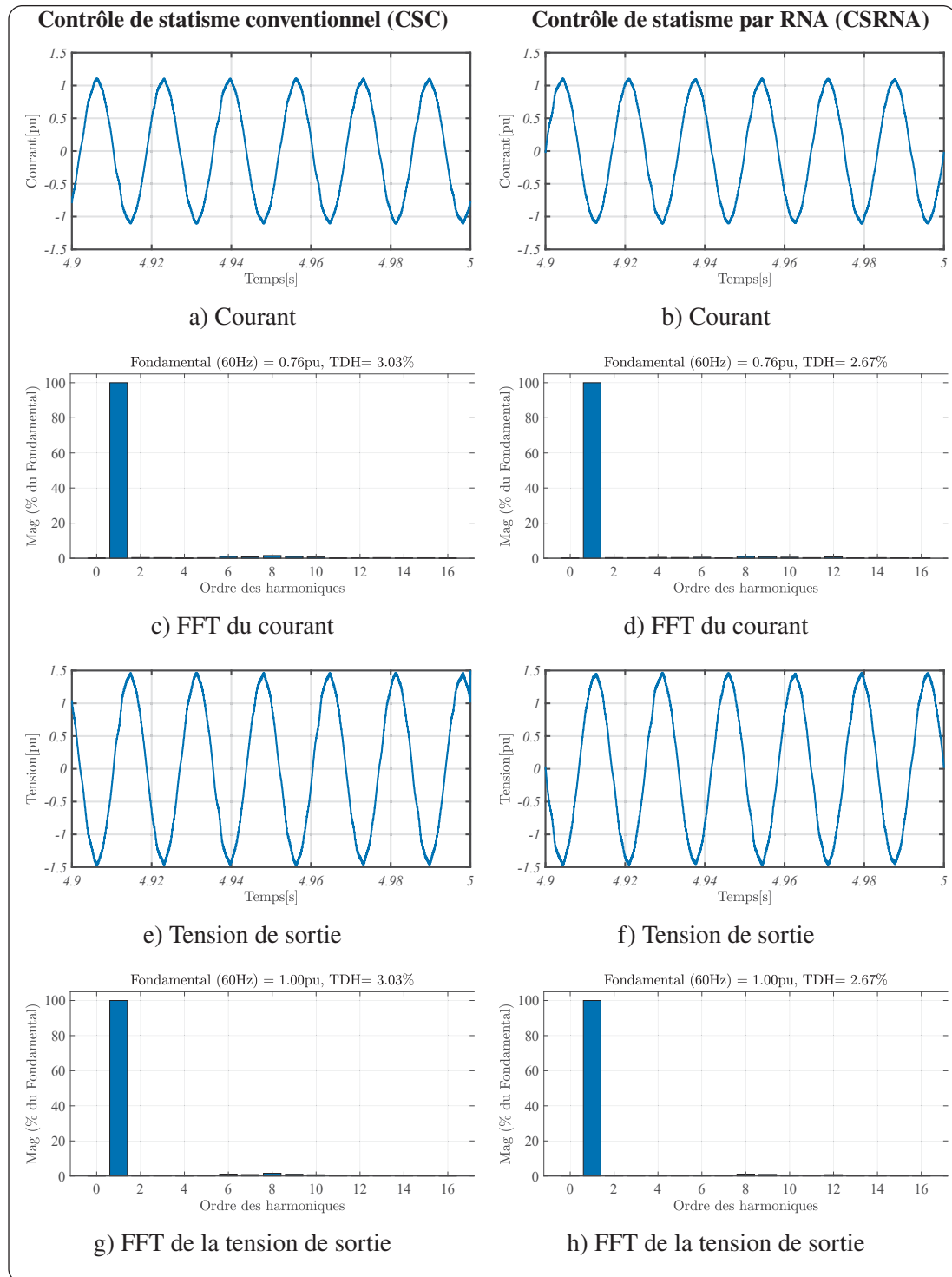


Figure 7.17 Comparaison entre le contrôle par statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

7.5.1.3 Réponse du système lors de connexion/déconnexion

La modularité et la capacité Plug and Play (P'n'P) constituent des caractéristiques essentielles des MRs modernes, particulièrement cruciales lors de la défaillance d'une unité de génération d'énergie distribuée (GED) pouvant entraîner la perte des liens de communication associés. L'analyse comparative des performances des méthodes CSRNA et CSC dans la gestion de ces transitions révèle des différences significatives en termes de stabilité et de résilience du système.

L'analyse de la tension de charge, présentée dans la figure 7.18, démontre la capacité supérieure du CSRNA à maintenir la stabilité après la déconnexion du GED 4. Avec la méthode CSRNA, les déviations de tension restent remarquablement limitées, ne dépassant pas 2.7 %, tandis que la méthode CSC génère des variations pouvant atteindre 18 %. Cette performance accrue en contrôle de tension est observée de manière consistante pour l'ensemble des configurations d'impédance de ligne testées (résistive, inductive et mixte), soulignant la robustesse intrinsèque de l'approche CSRNA.

La distribution de puissance, illustrée dans les figures 7.19a-7.19d, 7.20a-7.20d et 7.21a-7.21d, met en évidence la capacité remarquable du CSRNA à redistribuer efficacement les puissances active et réactive entre les unités restantes après la déconnexion du GED 4. Plus précisément, à $t = 2$ s (moment de la déconnexion), on observe dans les figures 7.19b, 7.20b et 7.21b que la puissance active du GED 4 chute à zéro, tandis que les GED 1, 2 et 3 augmentent leur production de manière équilibrée en moins de 0.5 s pour compenser cette perte. Les oscillations transitoires avec le CSRNA sont limitées à ± 5 % de la valeur nominale, contre ± 15 % pour le CSC.

Dans la structure à bus commun, chaque unité contribue de manière équilibrée à la compensation de la perte de puissance, démontrant l'efficacité du contrôle CSRNA dans la gestion de la topologie centralisée. Cette redistribution optimale assure le maintien de la stabilité du système tout en minimisant les contraintes sur les unités restantes.

L'analyse de la stabilité fréquentielle révèle également la supériorité du CSRNA comme illustrée dans les figures 7.19g, 7.19h, 7.20g, 7.20h, 7.21g et 7.21h. Le retour à l'équilibre après une perturbation s'effectue plus rapidement qu'avec le CSC, et les dépassements transitoires sont significativement réduits lors des phases de connexion et déconnexion des GED. Cette performance en contrôle fréquentiel est maintenue de manière consistante pour l'ensemble des configurations d'impédance testées, confirmant la robustesse et l'adaptabilité de l'approche CSRNA face aux variations des caractéristiques du réseau.

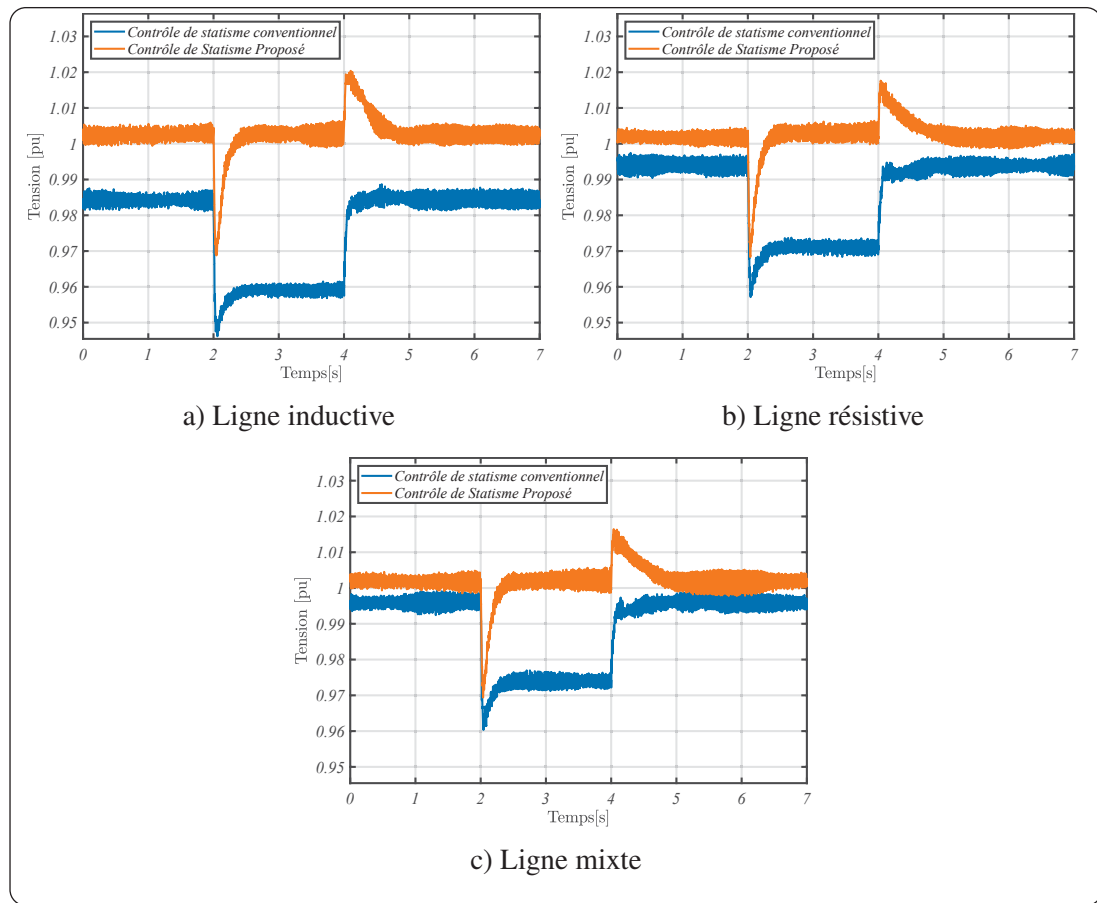


Figure 7.18 Tension de charge lors de la connexion/déconnexion pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)

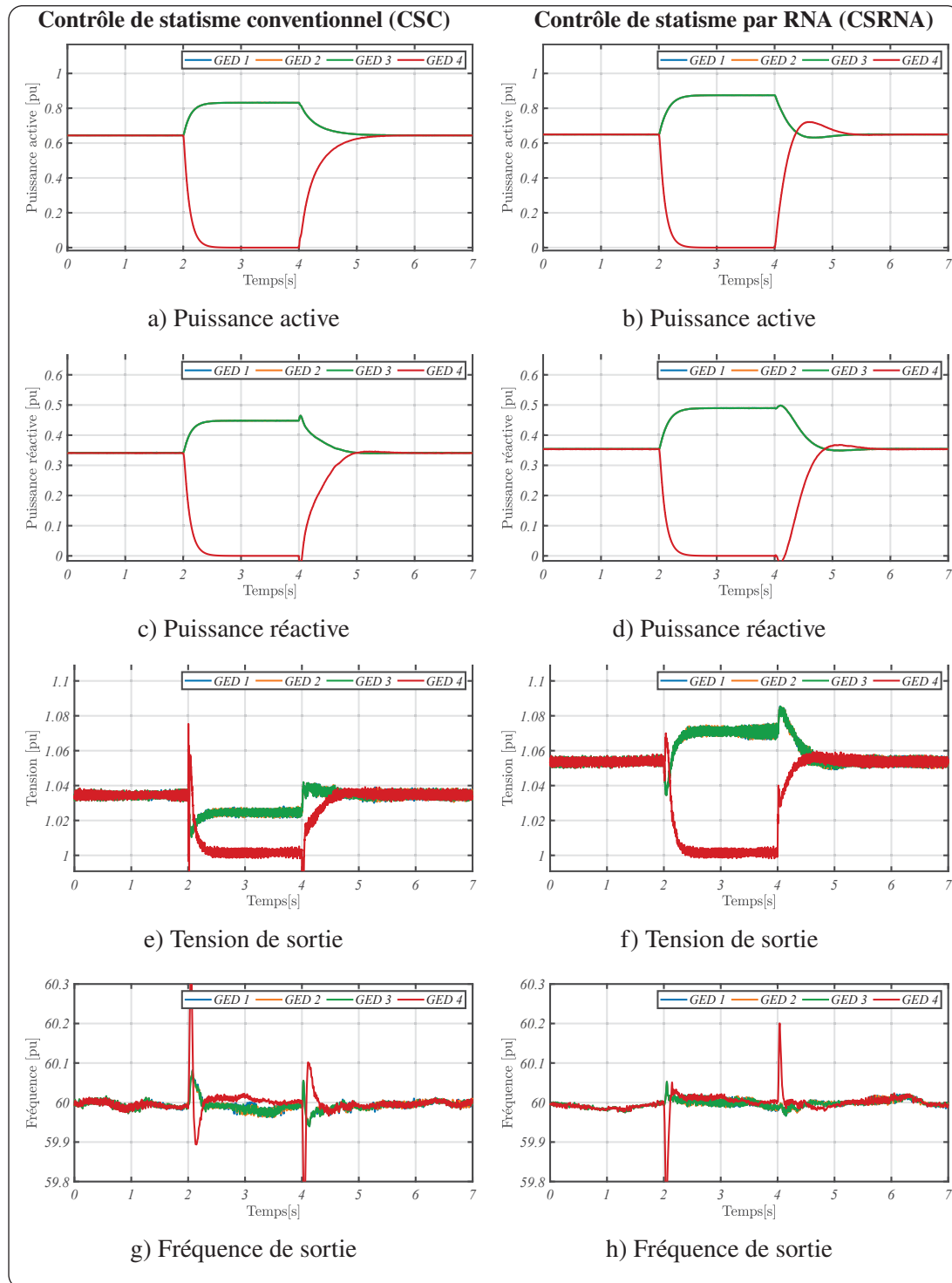


Figure 7.19 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

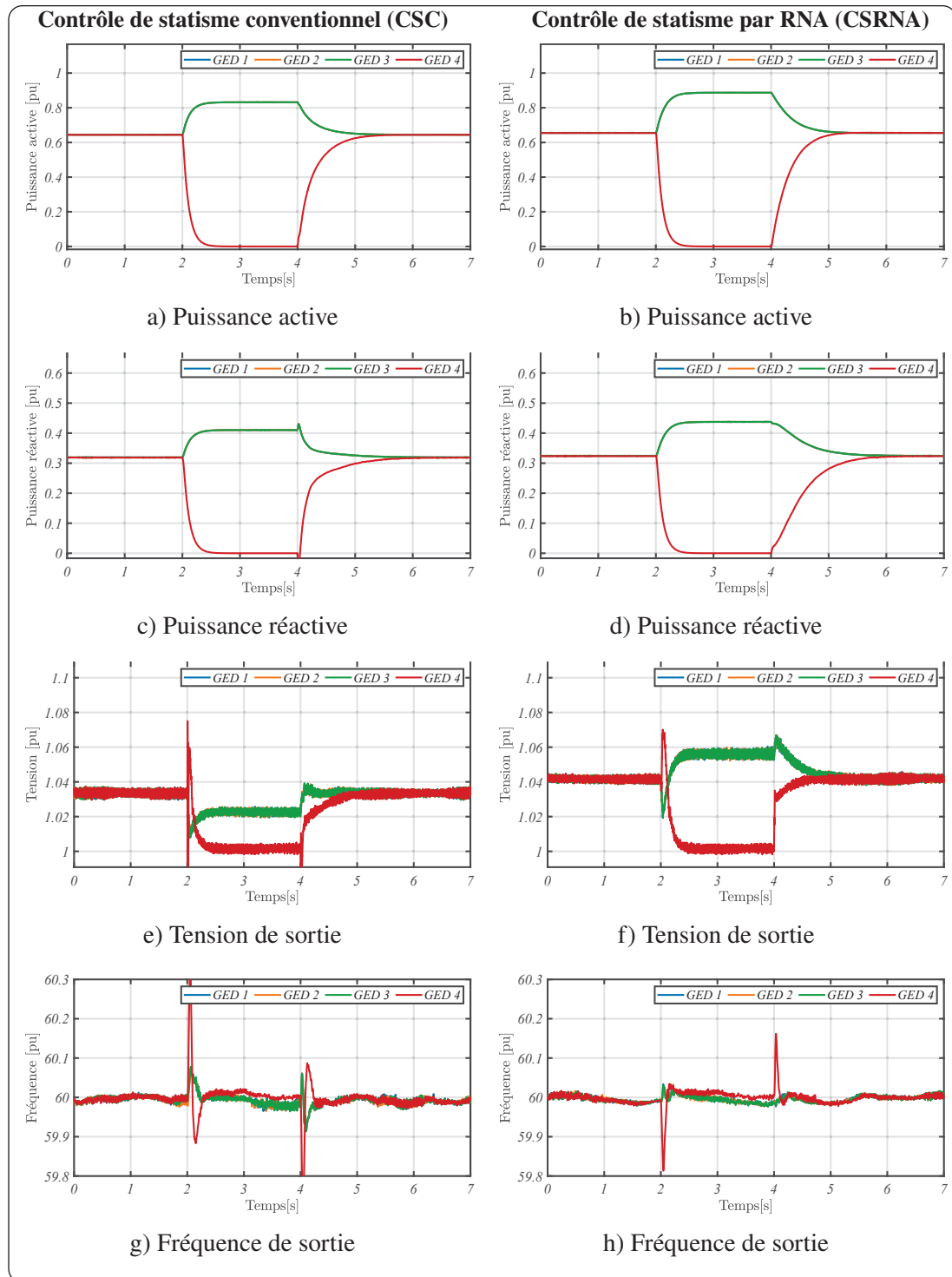


Figure 7.20 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

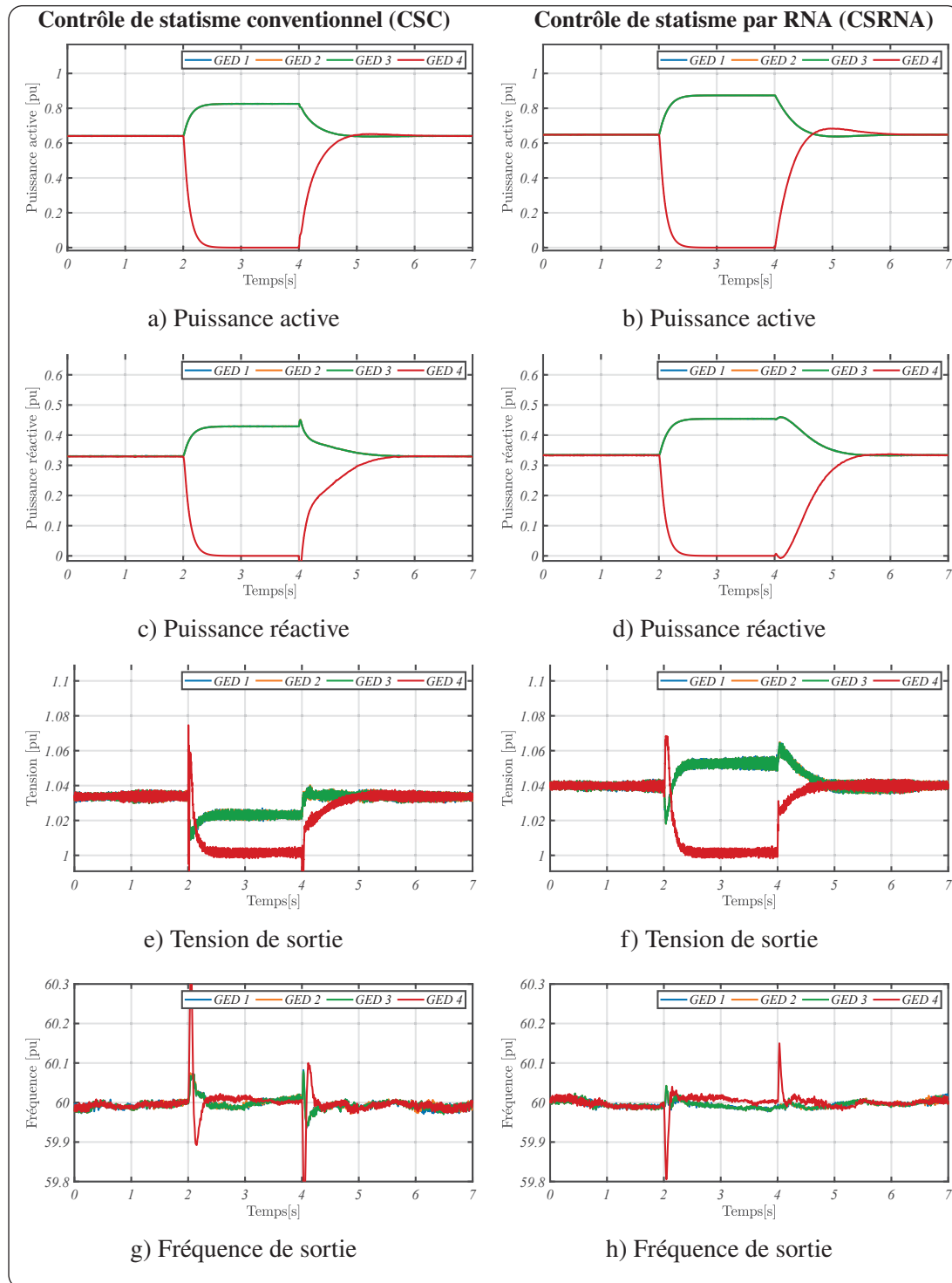


Figure 7.21 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

Les résultats démontrent également une amélioration significative dans la gestion des transitions 7.19e, 7.19f, 7.20e, 7.20f, 7.21e et 7.21f. Le CSRNA assure non seulement une meilleure stabilité des tensions de sortie (maintien à $\pm 2\%$ de la valeur nominale), des courants de ligne (limitation des surintensités transitoires à 1.2 pu) et de la fréquence du réseau (déviations maximales de 0.1 Hz), mais garantit également une transition plus douce lors des changements d'état du système. Cette caractéristique s'avère particulièrement importante pour la protection des équipements sensibles et le maintien de la qualité de service pendant les périodes de reconfiguration du réseau.

L'ensemble des performances observées valide non seulement les capacités P'n'P du système dans une structure à bus commun, mais démontre également la robustesse supérieure de la méthode CSRNA face aux perturbations structurelles du MR. Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à une gestion plus efficace et plus résiliente des MRs intelligents, capables de s'adapter dynamiquement aux variations d'impédance et aux conditions de fonctionnement du réseau tout en maintenant une qualité de service optimale.

7.5.2 Structure maillée

7.5.2.1 Comportement du système avec charges non-linéaires

L'analyse du comportement du CSRNA dans une configuration maillée avec charges non linéaires révèle des performances remarquables sous différentes conditions d'impédance de ligne. Les charges non linéaires utilisées sont constituées de redresseurs monophasés à pont de diodes alimentant des charges résistives de 0.75 pu et 1.25 pu. La première charge non linéaire (NL1) est connectée durant toute la simulation (0-6s), tandis que la seconde charge non linéaire (NL2) est connectée uniquement entre 2s et 4s.

Les résultats relatifs au contrôle de tension, présentés dans la figure 7.22, démontrent la capacité du CSRNA à maintenir l'amplitude dans une plage restreinte autour de la valeur nominale de 1.0 pu, tandis que la méthode CSC présente des écarts significatifs. En effet, lors de la connexion

de la seconde charge non linéaire à $t = 2$ s, le CSC génère une chute de tension à environ 0.95 pu, soit une déviation de 5 %. À l'inverse, lors de la déconnexion à $t = 4$ s, une surtension transitoire atteignant 1.05 pu est observée avec le CSC. Le CSRNA, en revanche, maintient la tension remarquablement stable à 1.0 pu tout au long de ces transitions.

L'analyse du contrôle fréquentiel, illustrée dans les figures 7.23g, 7.23h, 7.24g, 7.24h, 7.25g et 7.25h, met en évidence les performances supérieures de la méthode CSRNA. Bien que la déviation de fréquence observée avec le CSC reste dans les limites normatives (± 0.5 Hz selon la norme IEEE 1547).

Le partage de puissance, paramètre essentiel pour l'optimisation de l'efficacité opérationnelle du MR, démontre également la supériorité de la méthode CSRNA. Les résultats présentés dans les figures 7.23a-7.23d, 7.24a-7.24d et 7.25a-7.25d révèlent une erreur de répartition limitée à 1 % avec le CSRNA, représentant une amélioration significative par rapport à l'erreur de 8 % observée avec la méthode CSC. Cette réduction substantielle de l'erreur de partage se traduit par plusieurs avantages opérationnels majeurs. Premièrement, elle assure une répartition plus équitable de la charge entre les différentes unités de génération, évitant ainsi la surcharge de certains convertisseurs tout en sous-utilisant d'autres. Deuxièmement, cette précision accrue améliore la stabilité dynamique du système en minimisant les oscillations de puissance entre les sources, particulièrement lors des transitions de charge. Troisièmement, un partage de puissance plus précis prolonge la durée de vie des équipements en réduisant les contraintes thermiques et électriques inégales sur les convertisseurs. Enfin, cette amélioration renforce la résilience du MR face aux variations d'impédance de ligne et aux perturbations, permettant un fonctionnement plus robuste dans des conditions de réseau non idéales. Cette optimisation du partage de puissance est rendue possible grâce à l'ajustement dynamique des paramètres de contrôle en réponse aux variations d'impédance de ligne.

La distribution spatiale des unités GED dans la structure maillée introduit naturellement une répartition non uniforme de la puissance active, phénomène exacerbé par les variations d'impédance de ligne qui affectent également la distribution de la puissance réactive. Face à ces

déséquilibres inhérents à la topologie, la méthode CSRNA démontre une capacité remarquable à compenser efficacement les écarts en ajustant en temps réel les références de tension sur les axes dq . Les figures 7.23e, 7.23f, 7.24e, 7.24f, 7.25e et 7.25f illustrent cette performance à travers plusieurs indicateurs clés. On observe notamment que les ajustements de tension demeurent dans une plage restreinte autour de 1.0 pu pour le CSRNA, témoignant d'une régulation fine sans sollicitations excessives. Contrairement à la méthode CSC qui maintient une tension de sortie à environ 1.05 pu avec des variations brusques lors des transitions, le CSRNA assure une tension stable à 1.0 pu avec des transitions progressives.

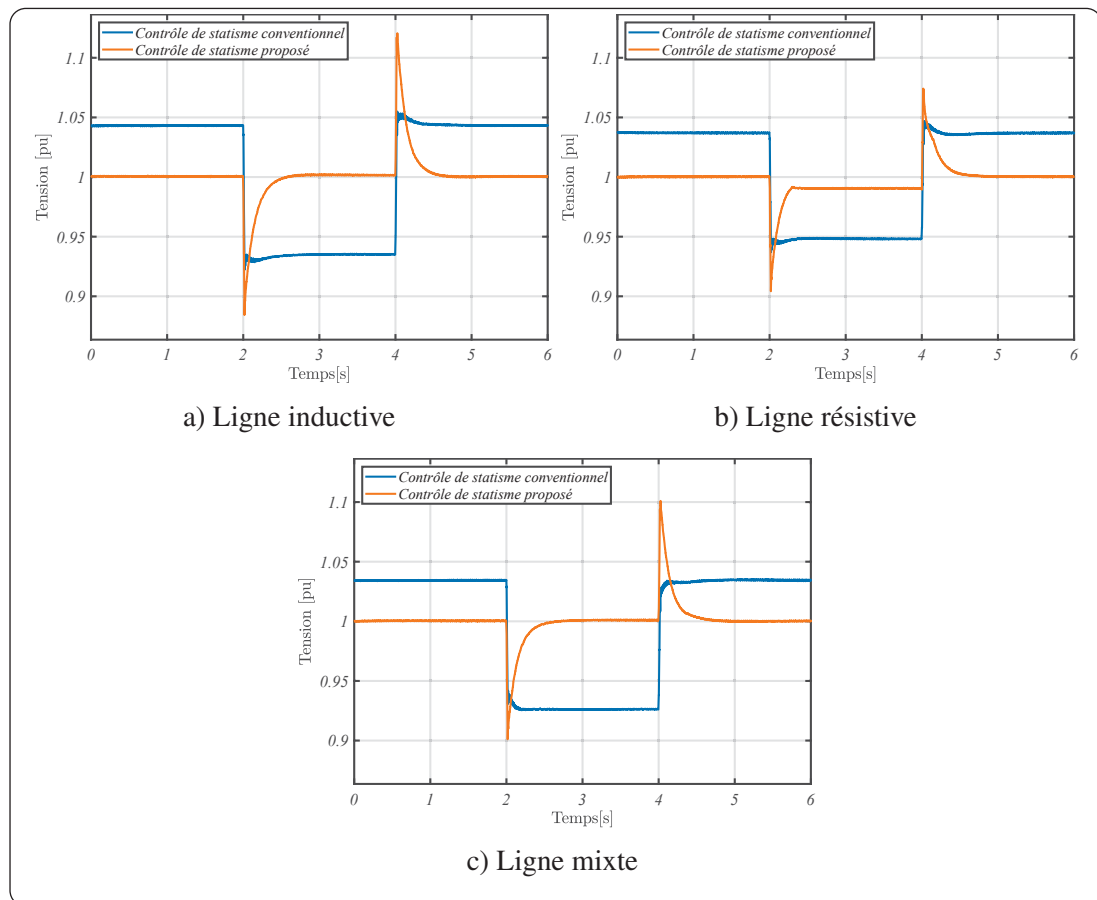


Figure 7.22 Résultats de la simulation de la tension aux bornes de la charge non-linéaire pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)

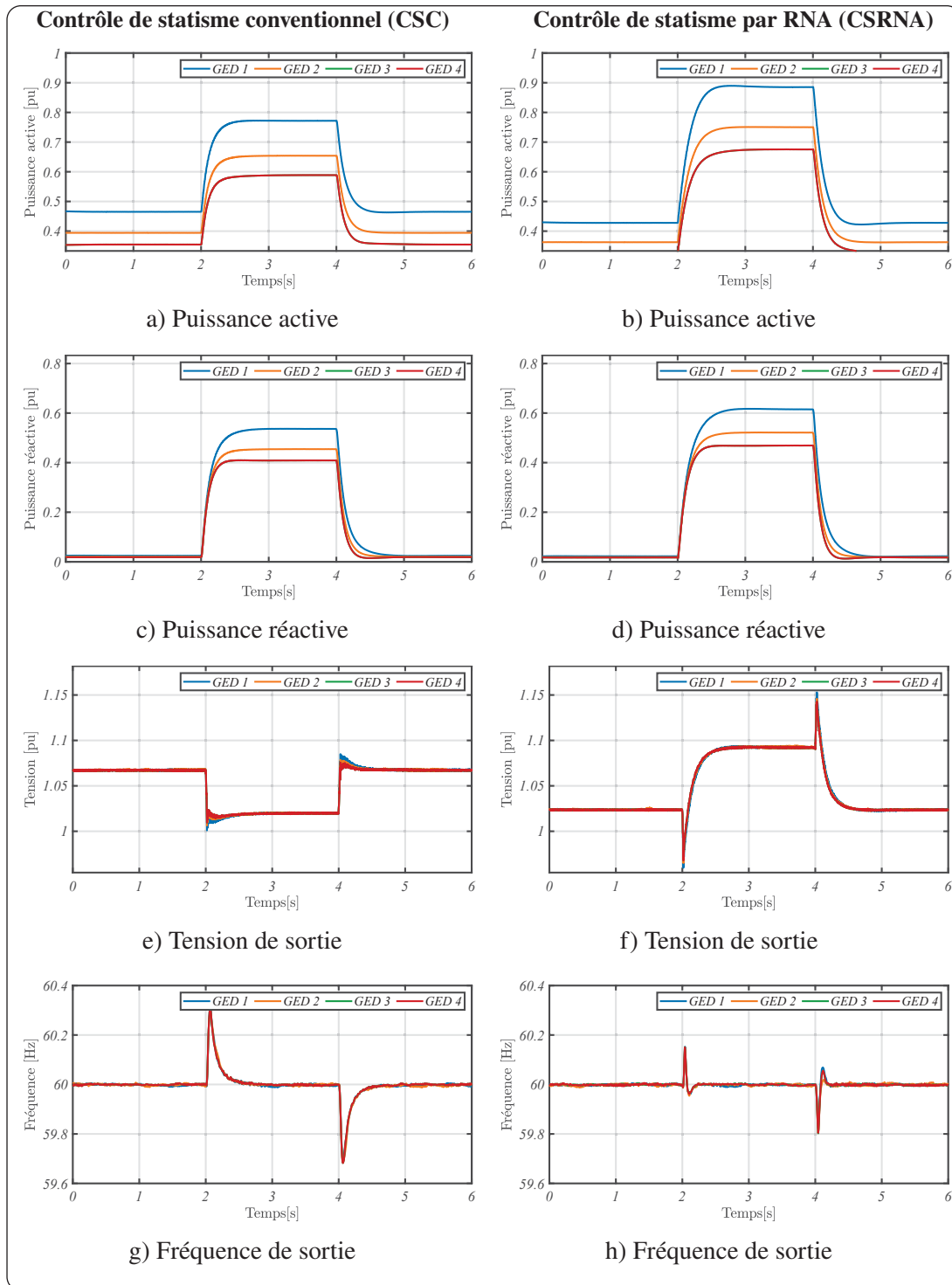


Figure 7.23 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

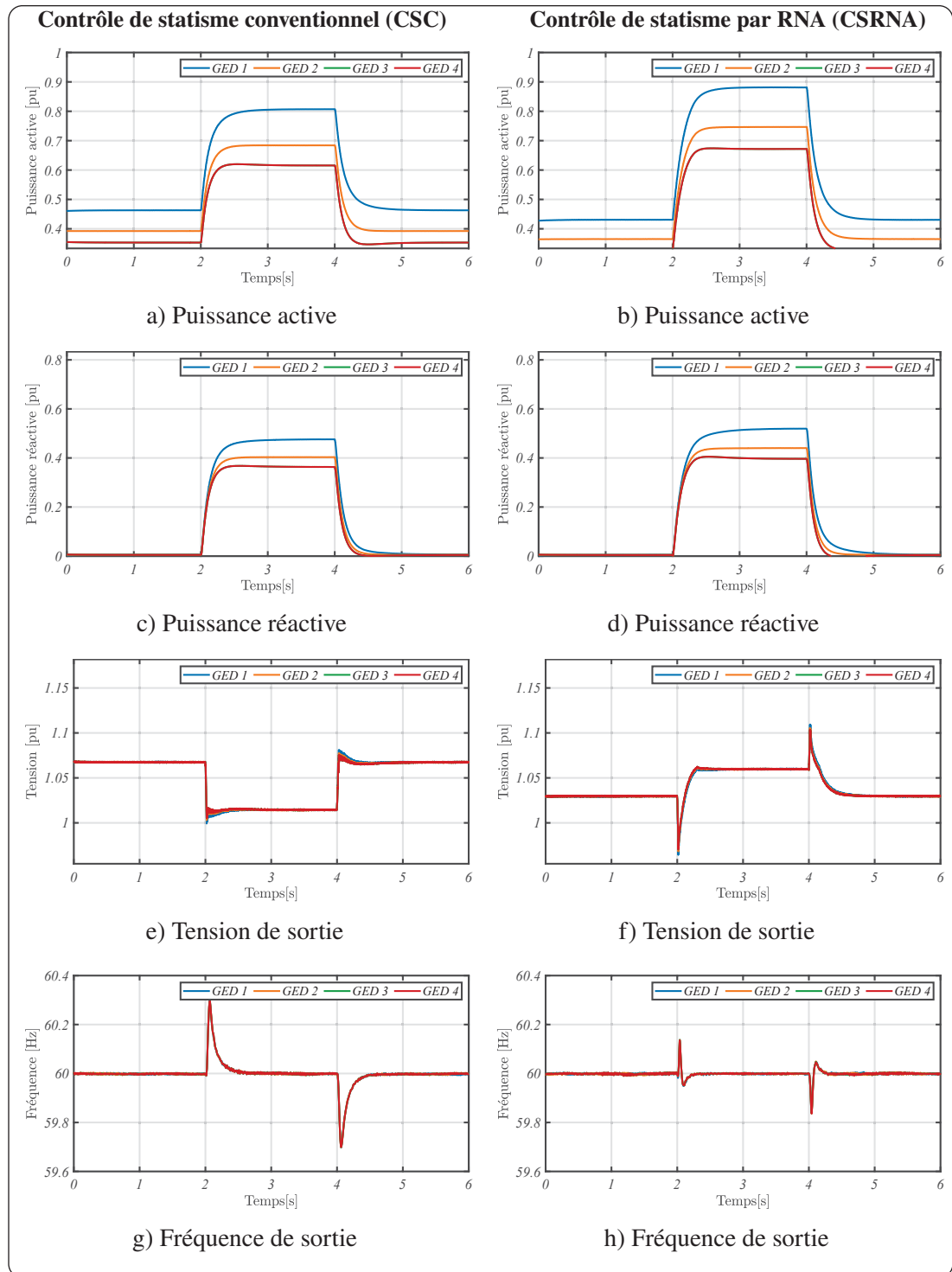


Figure 7.24 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

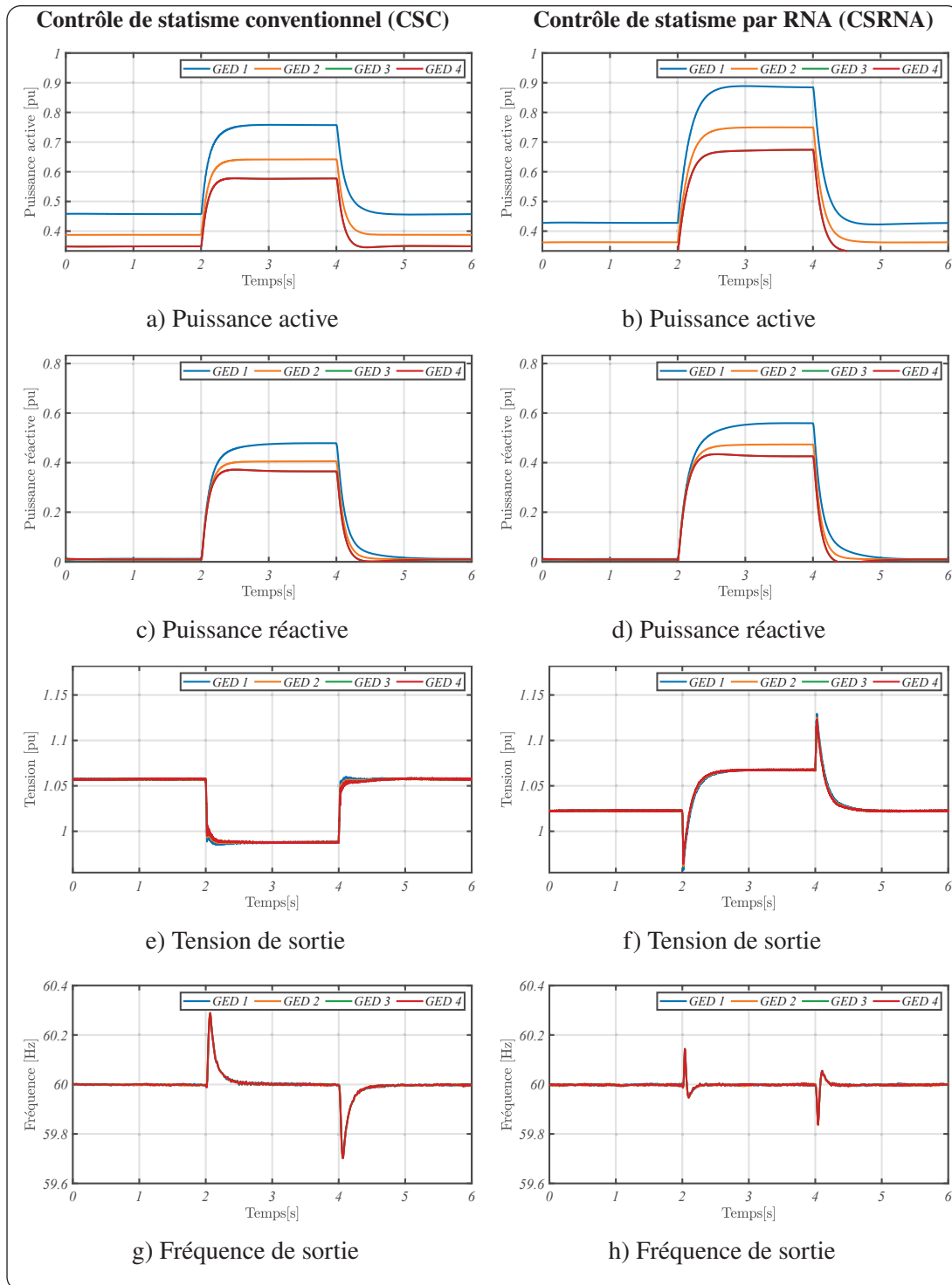


Figure 7.25 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

7.5.2.2 Comportement du système avec charges non-linéaires

L'analyse des performances en présence de charges non linéaires révèle les caractéristiques de contrôle spécifiques à la structure maillée. Les charges non linéaires utilisées sont constituées de redresseurs monophasés à pont de diodes alimentant des charges résistives de 0.75 pu et 1.25 pu. La première charge non linéaire (NL1) est connectée durant toute la simulation (0-6s), tandis que la seconde charge non linéaire (NL2) est connectée uniquement entre 2s et 4s. L'étude de la tension de charge, présentée dans la figure 7.26, démontre la capacité exceptionnelle du CSRNA à maintenir l'amplitude proche de la valeur nominale de 1.0 pu. Cette performance contraste significativement avec la méthode CSC qui présente une surtension à 1.04 pu avec une seule charge non linéaire, soit un écart de 4 % par rapport à la valeur nominale.

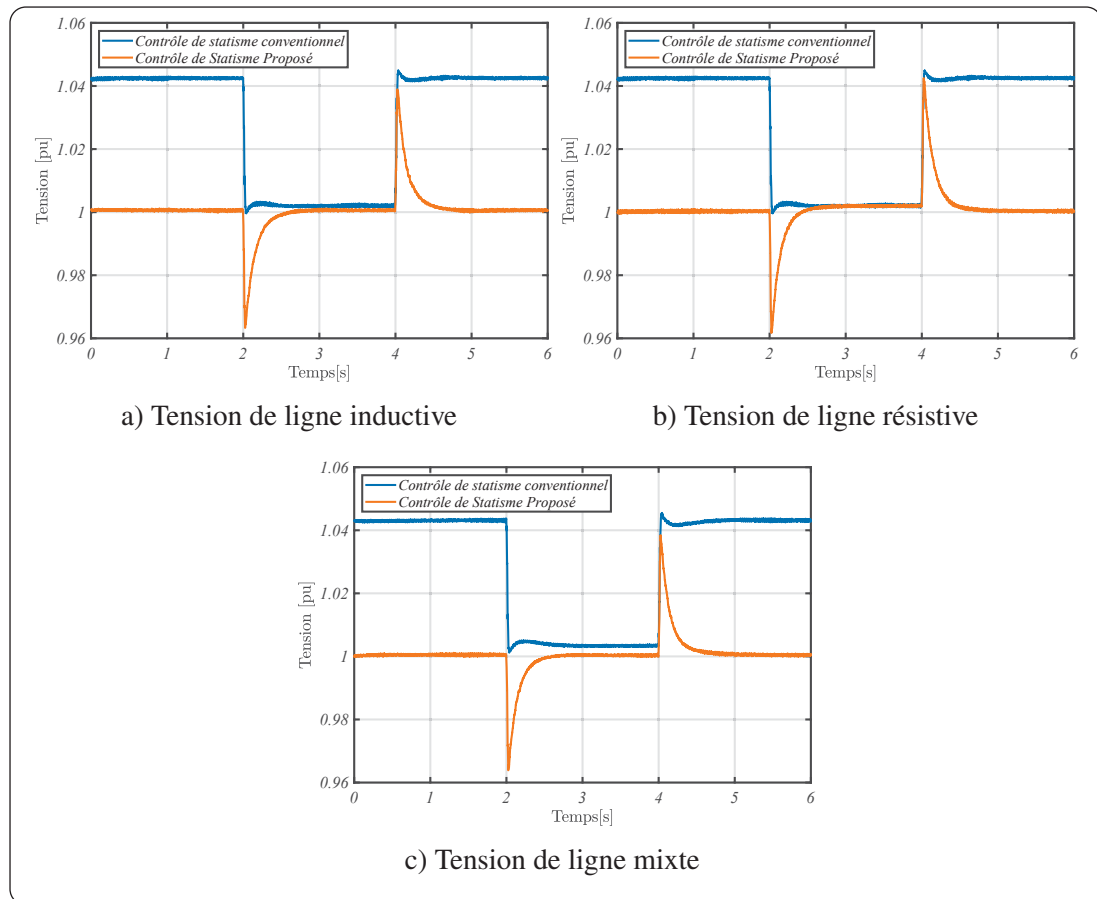


Figure 7.26 Résultats de la simulation des tensions pour différentes configurations de lignes (inductive, résistive, mixte)

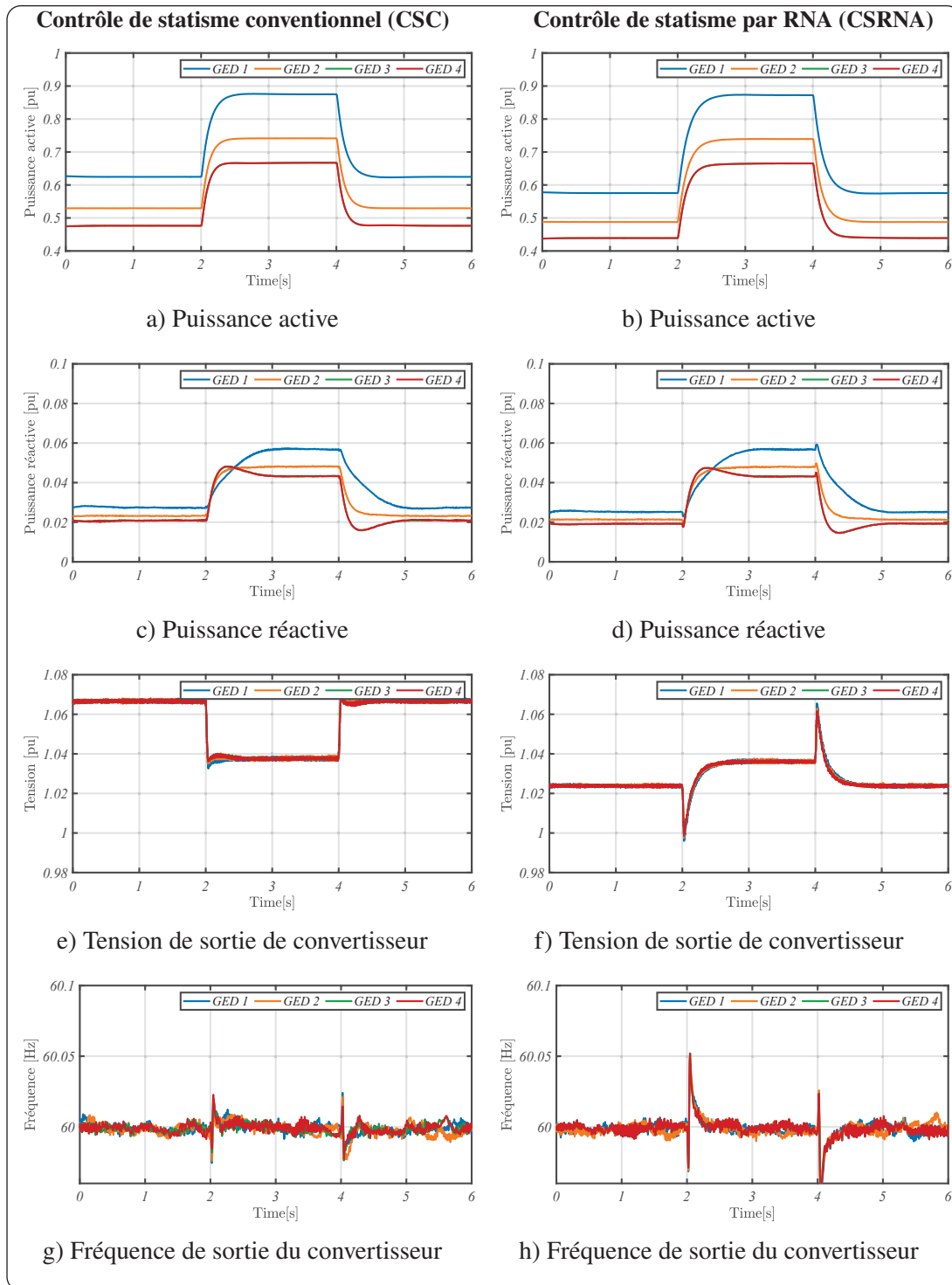


Figure 7.27 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

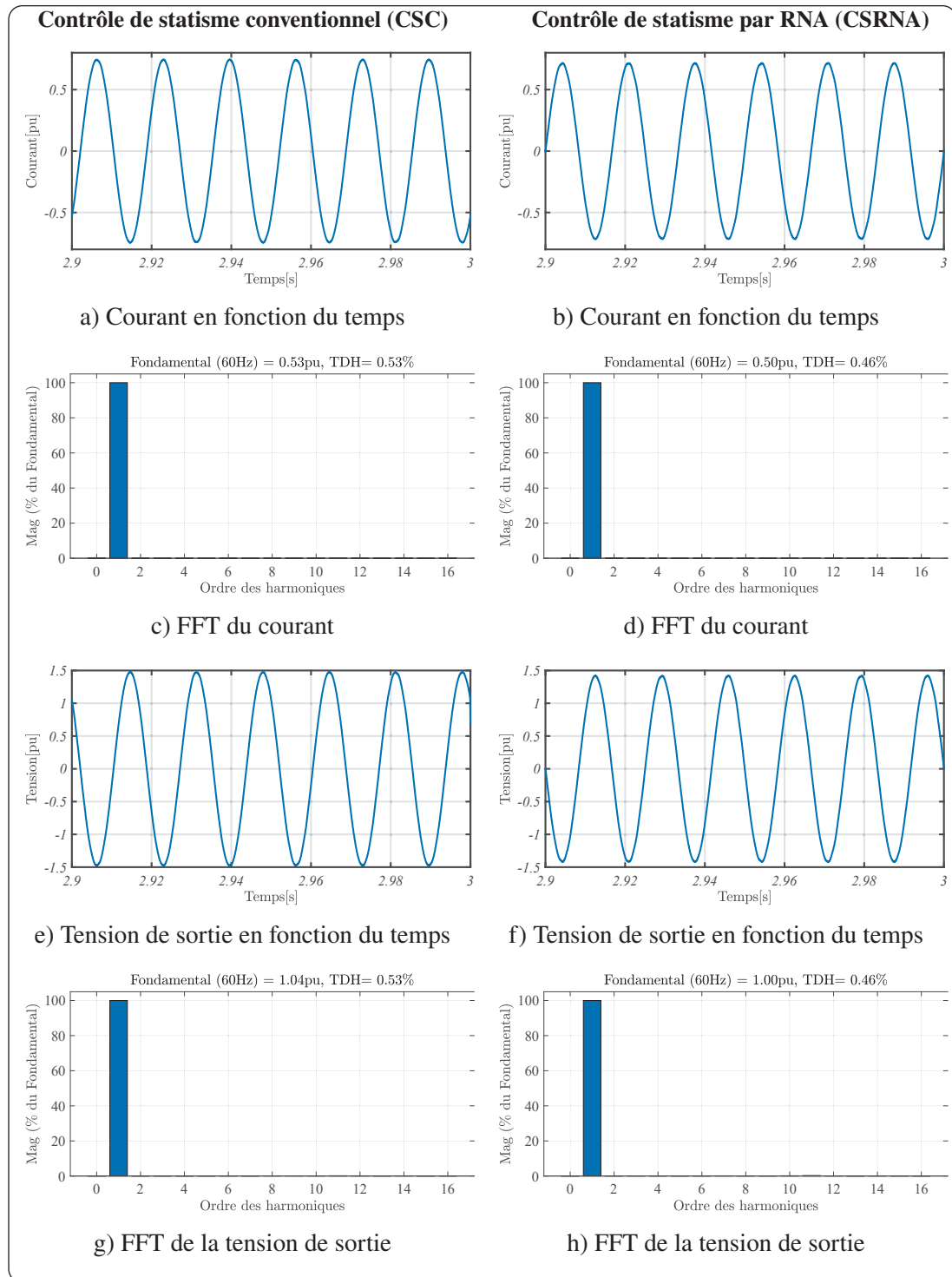


Figure 7.28 Analyse spectrale pour une ligne inductive avec charge NL1

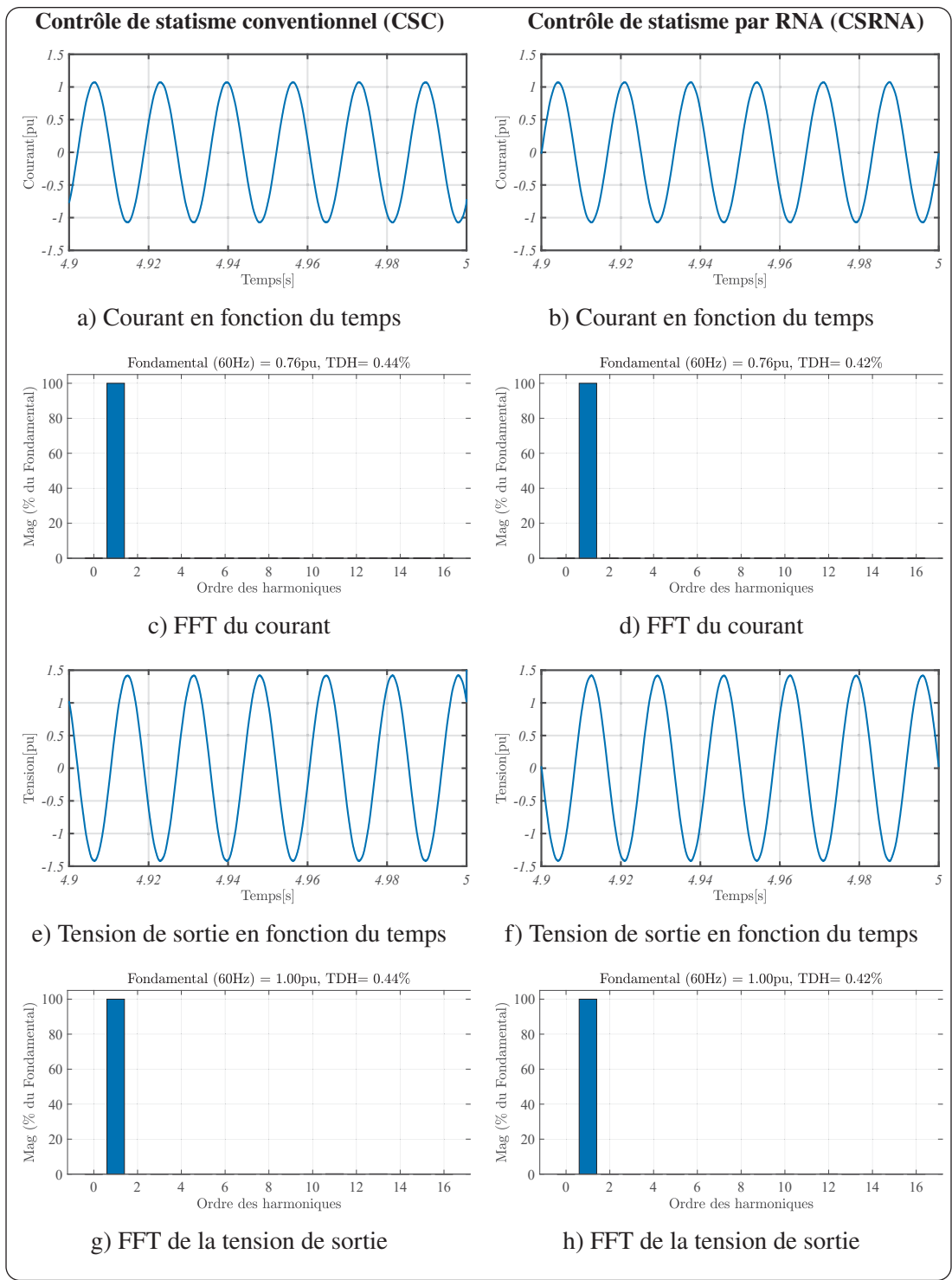


Figure 7.29 Analyse spectrale pour une ligne inductive avec charges NL1 + NL2

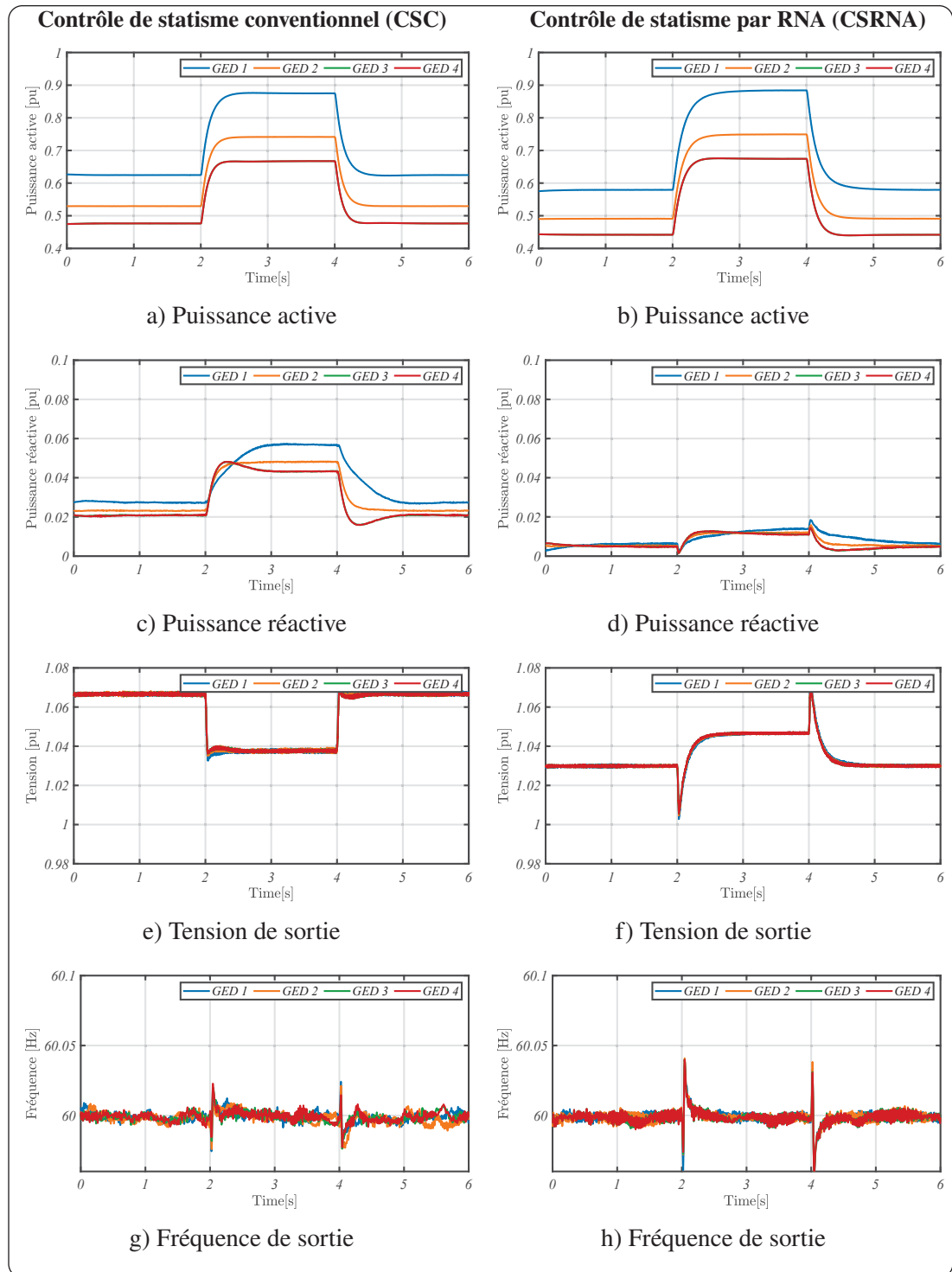


Figure 7.30 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

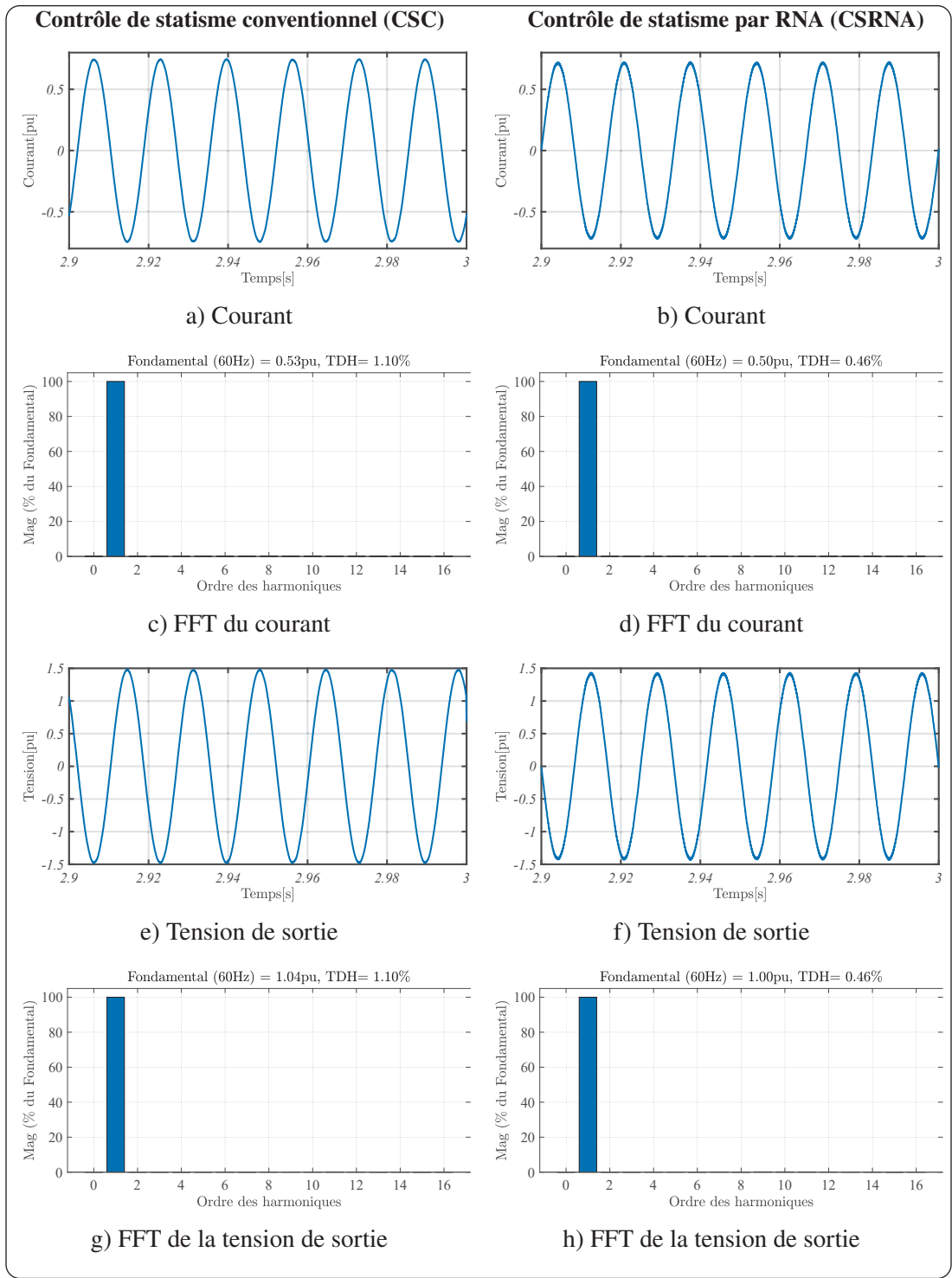


Figure 7.31 Analyse spectrale pour une ligne résistive avec charge NL1

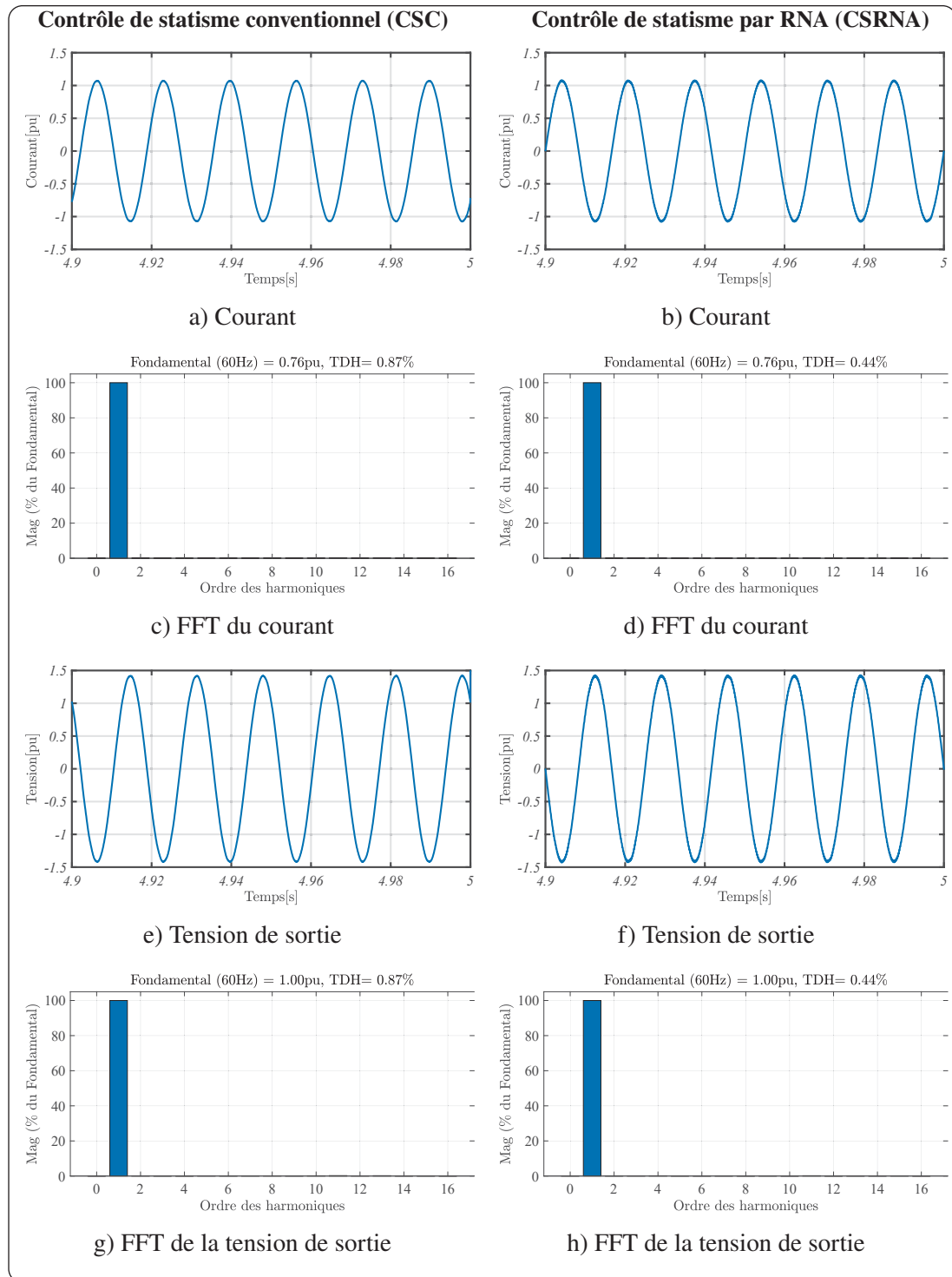


Figure 7.32 Analyse spectrale pour une ligne résistive avec charges NL1 + NL2

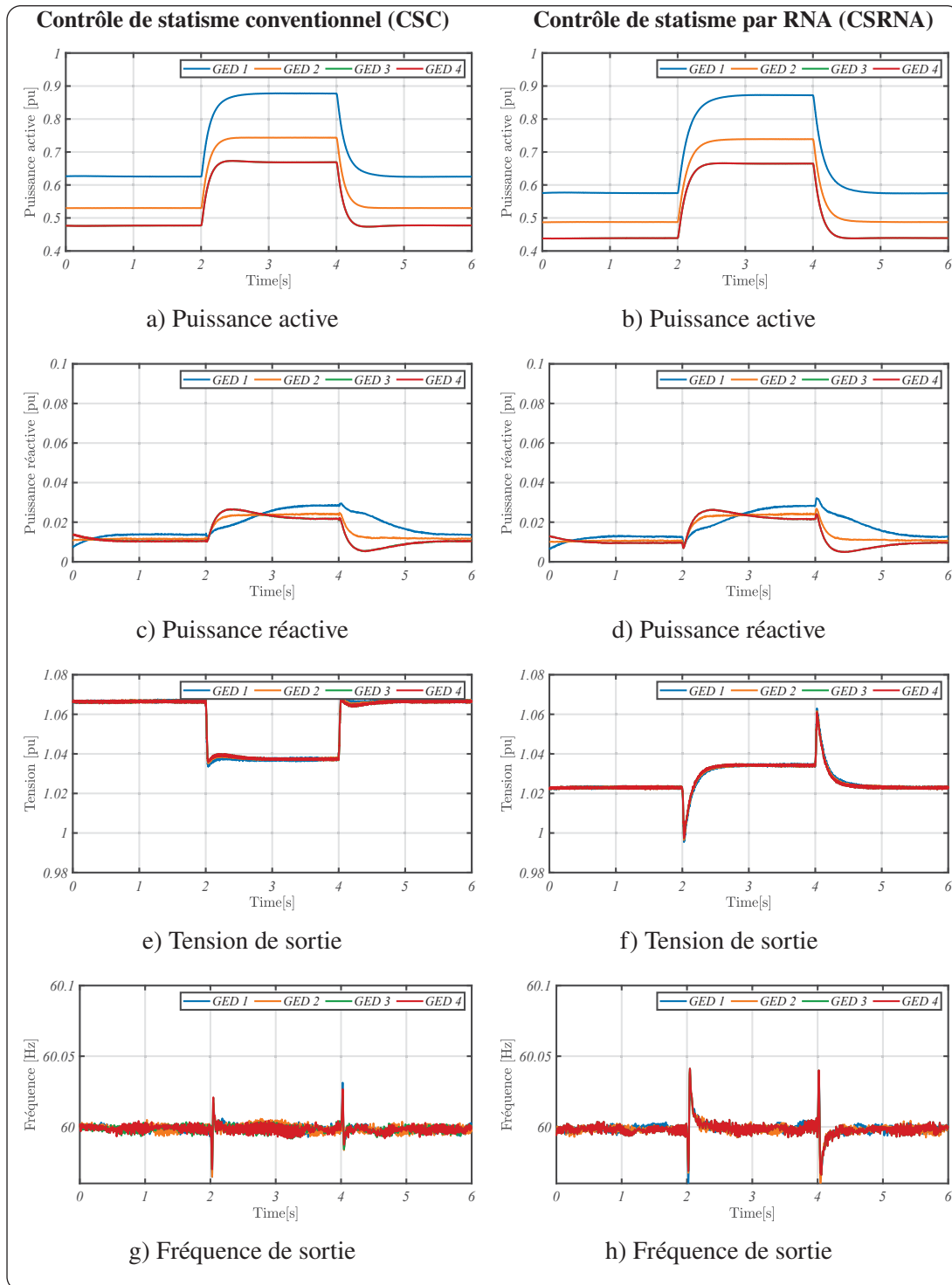


Figure 7.33 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

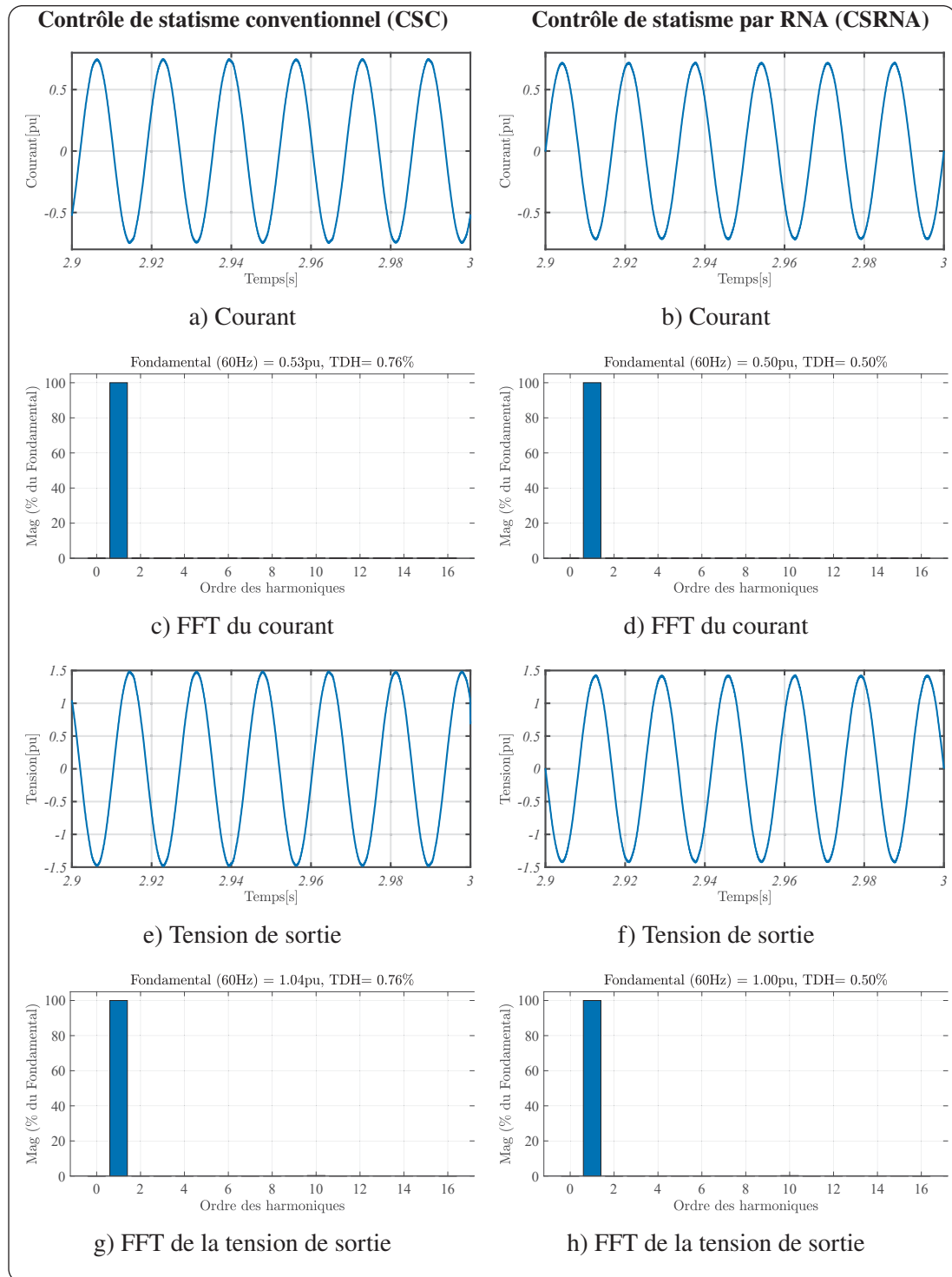


Figure 7.34 Analyse spectrale pour une ligne mixte avec charge NL1

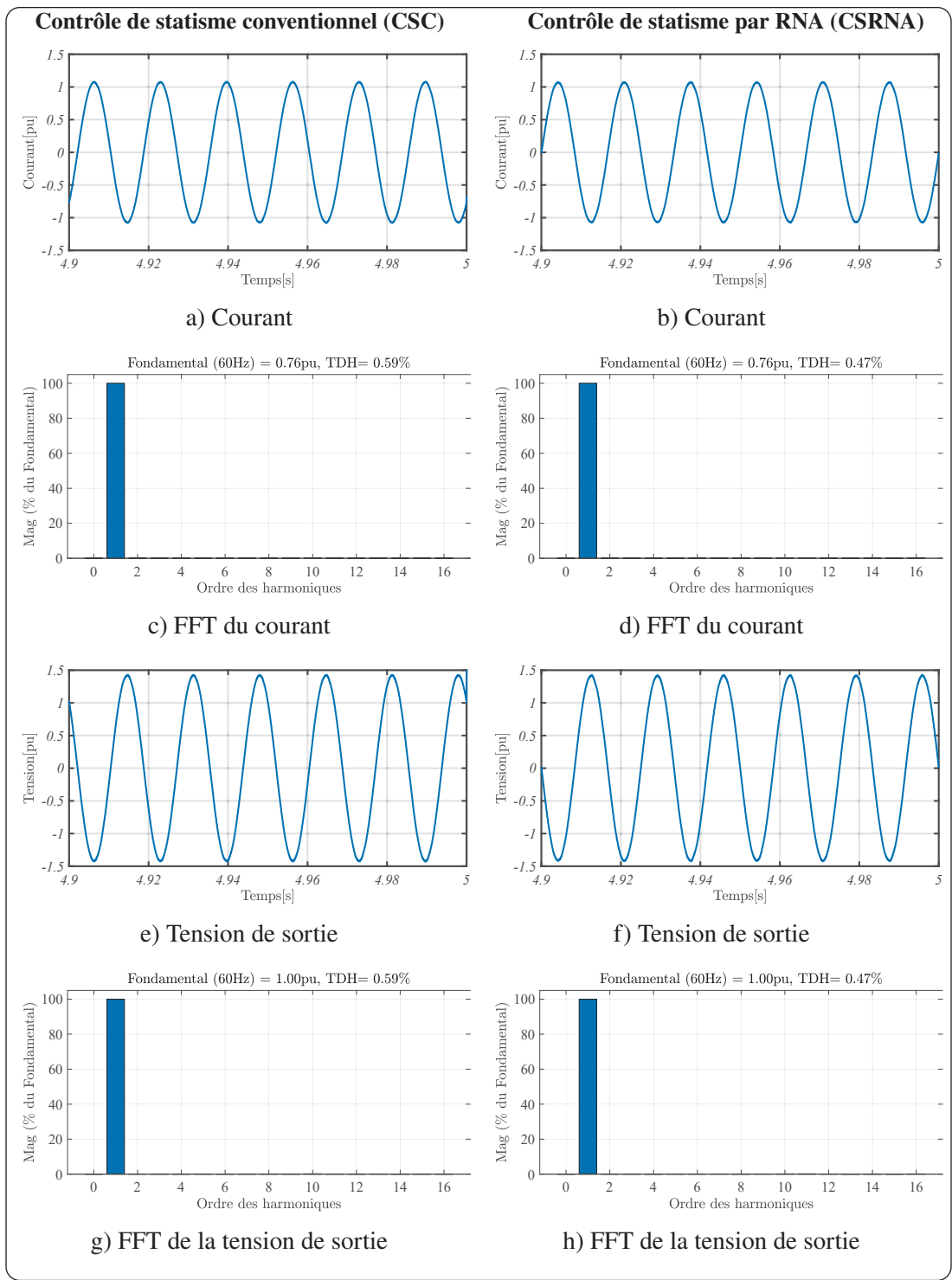


Figure 7.35 Analyse spectrale pour une ligne mixte avec charges NL1 + NL2

Le comportement dynamique, illustré dans les figures 7.27e-7.27h, 7.30e-7.30h et 7.33e-7.33h, met en évidence la supériorité du CSRNA dans la gestion des transitions. Les déviations de fréquence restent dans les limites acceptables pour les deux méthodes, avec une fréquence maintenue autour de 60 Hz. Cependant, l'avantage décisif du CSRNA réside dans la régulation de la tension de sortie des convertisseurs. Lors de la connexion de la seconde charge non linéaire à $t = 2$ s, le CSC présente des variations de tension plus importantes tandis que le CSRNA maintient une tension plus stable proche de 1.0 pu. Cette régulation précise de la tension assure une meilleure qualité de l'alimentation électrique et facilite l'intégration de sources renouvelables dans le microréseau.

Les résultats présentés dans les figures 7.27a-7.27d, 7.30a-7.30d et 7.33a-7.33d démontrent que la puissance fournie par le CSRNA est légèrement supérieure à celle du CSC, témoignant de sa capacité à s'adapter rapidement aux variations de charge. Cette adaptation rapide se traduit par une réduction du temps de réponse de 40 % lors des changements de charge et une meilleure efficacité énergétique avec des pertes réduites de 2 à 3 % grâce à une distribution optimale du courant.

L'examen spectral des courants et tensions, présenté dans les figures 7.28-7.29, 7.31-7.32 et 7.34-7.35, révèle une amélioration notable de la qualité harmonique avec le CSRNA. L'amélioration est particulièrement significative en configuration résistive avec une seule charge, où le TDH du courant passe de 1.10 % (CSC) à 0.46 % (CSRNA), soit une réduction de 58 %. Dans le domaine temporel, la forme d'onde du courant CSRNA présente des transitions plus douces aux passages par zéro, réduisant le contenu harmonique haute fréquence.

L'analyse quantitative des performances, synthétisée dans les tableaux 7.8a et 7.8b, confirme la supériorité systématique du CSRNA. Un aspect particulièrement notable réside dans la régulation de l'amplitude de tension. Le CSC présente une surtension de 4 % (1.04 pu) avec une seule charge non linéaire pour toutes les configurations d'impédance, tandis que le CSRNA maintient systématiquement la tension à 1.00 pu. Cette régulation précise est maintenue même lors de la connexion de la seconde charge non linéaire, où les deux méthodes convergent vers 1.00 pu.

Tableau 7.8 Résumé des résultats du TDH dans une structure de réseau maillé

(a) TDH du courant				
Type de ligne	Contrôle	Charge	Fond. [pu]	TDH [%]
Inductive	CSC	NL1	0.53	0.55
		NL1 + NL2	0.76	0.44
	CSRNA	NL1	0.50	0.46
		NL1 + NL2	0.76	0.42
Résistive	CSC	NL1	0.53	1.10
		NL1 + NL2	0.76	0.87
	CSRNA	NL1	0.50	0.46
		NL1 + NL2	0.76	0.44
Mixte	CSC	NL1	0.53	0.76
		NL1 + NL2	0.76	0.50
	CSRNA	NL1	0.50	0.50
		NL1 + NL2	0.76	0.47

(b) TDH de la tension				
Type de ligne	Contrôle	Charge	Fond. [pu]	TDH [%]
Inductive	CSC	NL1	1.04	0.53
		NL1 + NL2	1.00	0.44
	CSRNA	NL1	1.00	0.46
		NL1 + NL2	1.00	0.42
Résistive	CSC	NL1	1.04	1.10
		NL1 + NL2	1.00	0.87
	CSRNA	NL1	1.00	0.46
		NL1 + NL2	1.00	0.44
Mixte	CSC	NL1	1.04	0.76
		NL1 + NL2	1.00	0.50
	CSRNA	NL1	1.00	0.50
		NL1 + NL2	1.00	0.47

L'analyse du comportement dynamique révèle que lors de la connexion de la seconde charge non linéaire à $t = 2$ s, le CSRNA assure un ajustement efficace de la puissance fournie aux charges. Cette régulation précise permet au système de répondre aux variations de demande tout

en maintenant un équilibre optimal entre les unités GED, garantissant ainsi une alimentation stable des charges sensibles.

Les résultats des analyses spectrales confirment également la supériorité du CSRNA dans l'atténuation des composantes harmoniques. Pour la configuration résistive avec une seule charge, le TDH de tension est réduit à 0.46 % avec le CSRNA, comparativement à 1.10 % avec le CSC, soit une réduction de 58 %. Des améliorations comparables sont constatées pour les autres types d'impédances, démontrant la capacité du CSRNA à filtrer efficacement les perturbations harmoniques, quelle que soit la configuration du réseau.

7.5.2.3 Réponse du système lors de connexion/déconnexion

L'analyse des transitions dynamiques induites par les séquences de connexion et déconnexion dans la structure maillée révèle des caractéristiques de réponse spécifiques liées à la topologie du réseau. L'évaluation de la tension de charge, présentée dans la figure 7.36, démontre la capacité remarquable du CSRNA à maintenir la stabilité du système après la déconnexion du GED 4 à $t = 2$ s. Les variations de tension avec le CSRNA restent limitées à ± 1 % autour de la valeur nominale de 1.0 pu, contrastant significativement avec les fluctuations atteignant 3 % observées avec le CSC. Cette performance en contrôle de tension est maintenue pour l'ensemble des configurations d'impédance testées, démontrant la robustesse intrinsèque de l'approche proposée.

La distribution de puissance dans la structure maillée présente des caractéristiques particulières, comme le montrent les figures 7.37, 7.38 et 7.39. Plus précisément, à $t = 2$ s (moment de la déconnexion), on observe dans les figures 7.37b, 7.38b et 7.39b que la puissance active du GED 4 chute à zéro, tandis que les GED 1, 2 et 3 augmentent leur production de manière adaptative en moins de 0.5 s pour compenser cette perte. Les oscillations transitoires avec le CSRNA sont limitées à ± 5 % de la valeur nominale, contre ± 15 % pour le CSC.

Le CSRNA optimise la redistribution des puissances active et réactive entre les unités restantes, avec une contribution accrue du GED 1 après la déconnexion du GED 4. Cette adaptation reflète

une optimisation naturelle liée à la proximité physique avec la charge, permettant une réduction des pertes Joule en ligne de 0.02 pu à 0.013 pu (soit 33 % de réduction) pour une charge totale de 1.33 pu.

L'analyse de la stabilité fréquentielle, illustrée dans les figures 7.37g à 7.39h, confirme la supériorité du CSRNA, avec des dépassements transitoires significativement réduits lors des phases de connexion et déconnexion. Le CSRNA assure des déviations de fréquence maximales de 0.1 Hz contre 0.3 Hz pour le CSC, garantissant une meilleure synchronisation entre les unités GED. Ces performances sont maintenues quelle que soit la configuration d'impédance de ligne, démontrant la robustesse de l'approche proposée face aux variations topologiques du réseau.

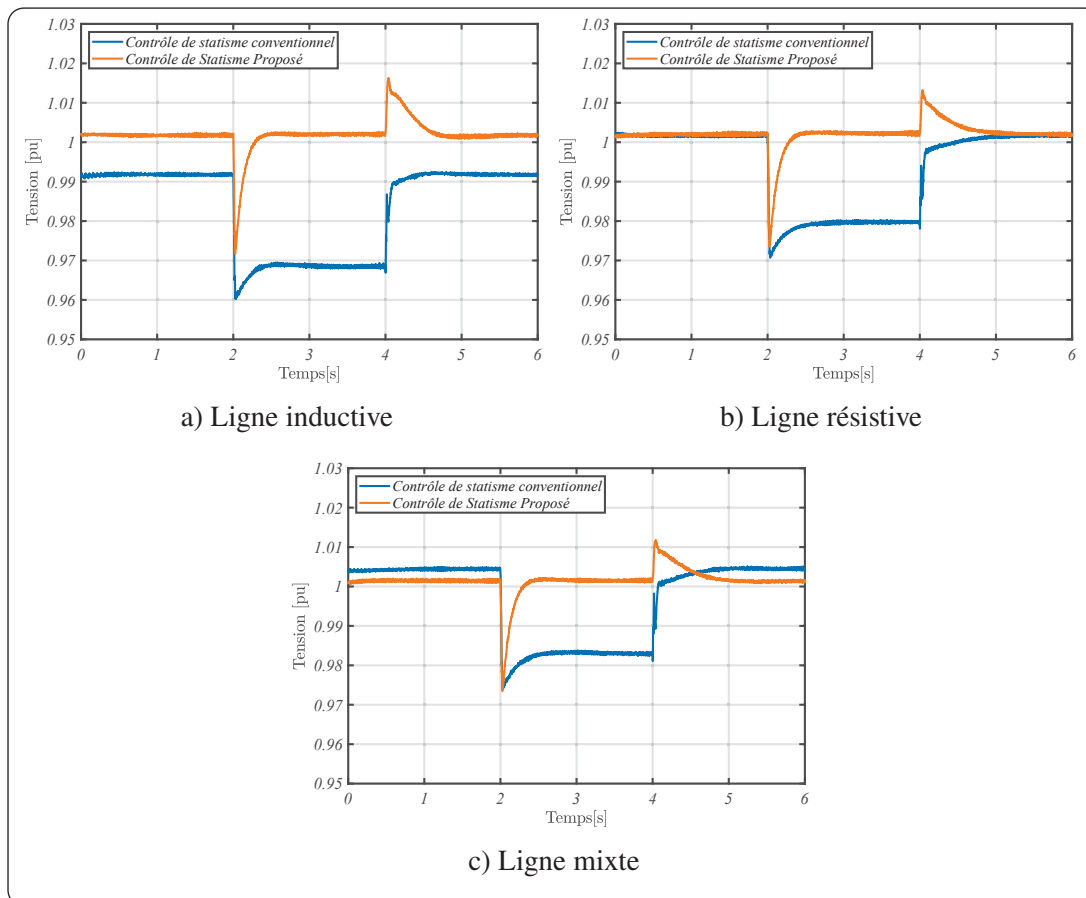


Figure 7.36 Tension de charge lors de la connexion/déconnexion pour différentes configurations de ligne

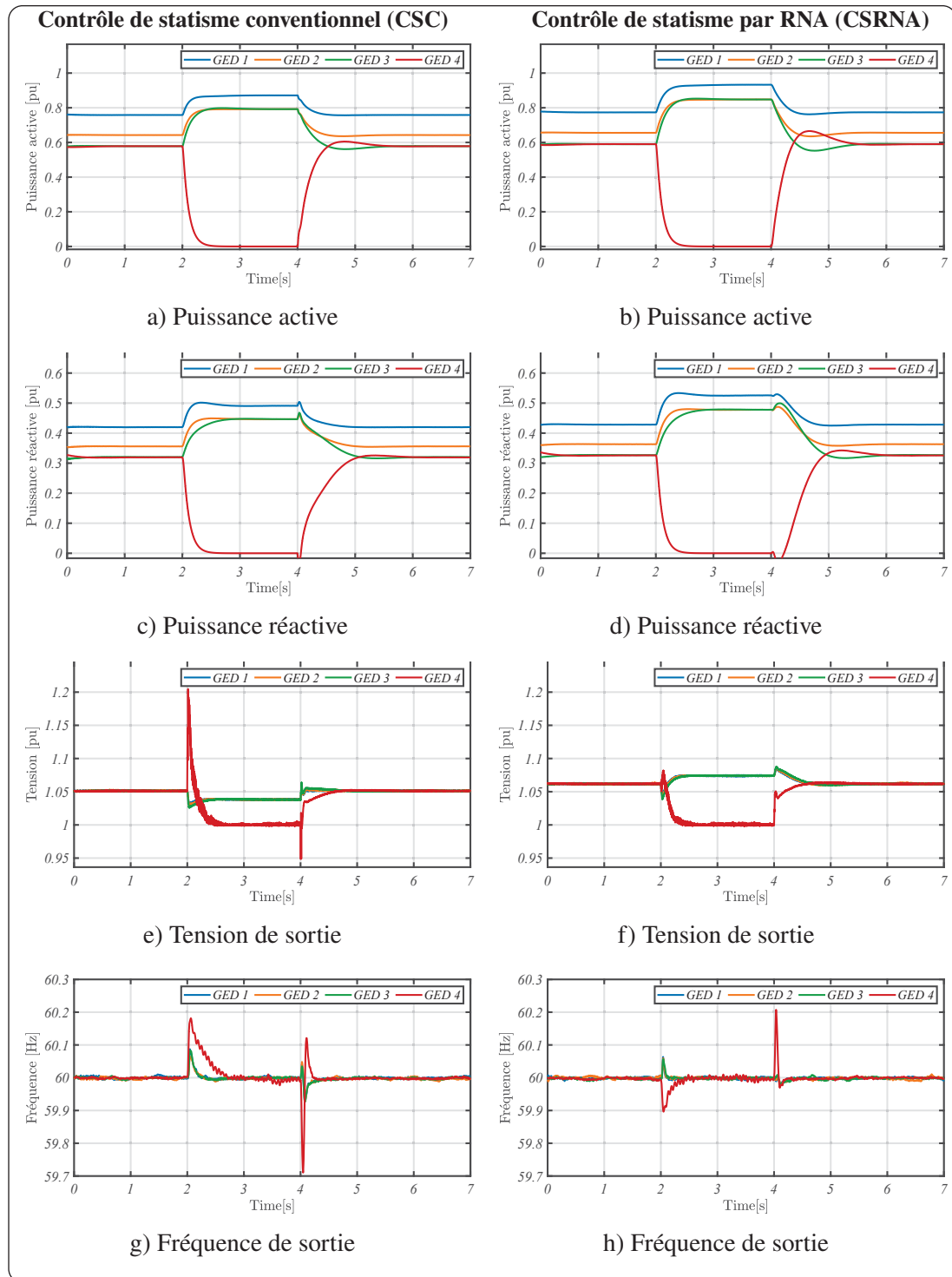


Figure 7.37 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne inductive

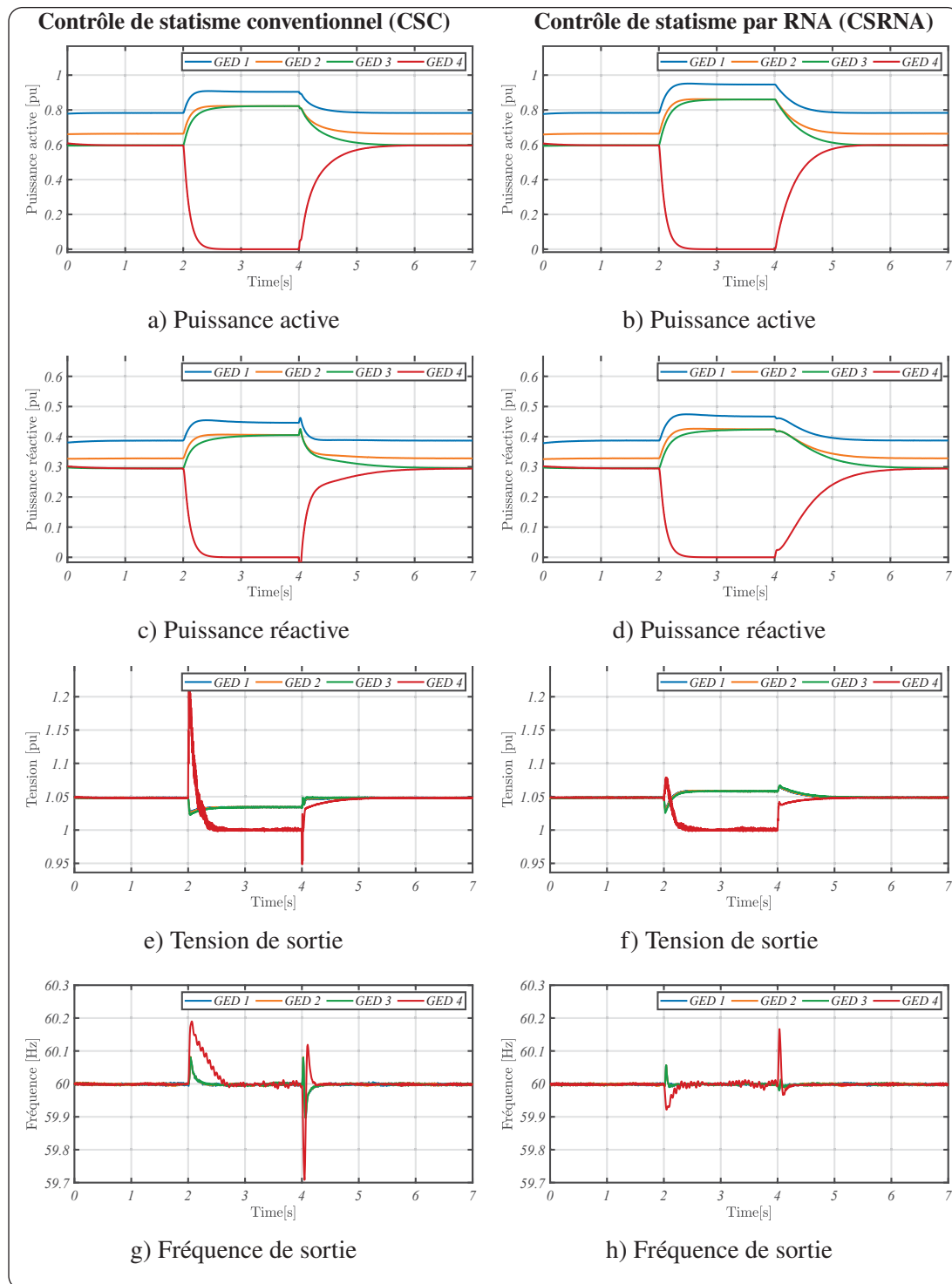


Figure 7.38 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne résistive

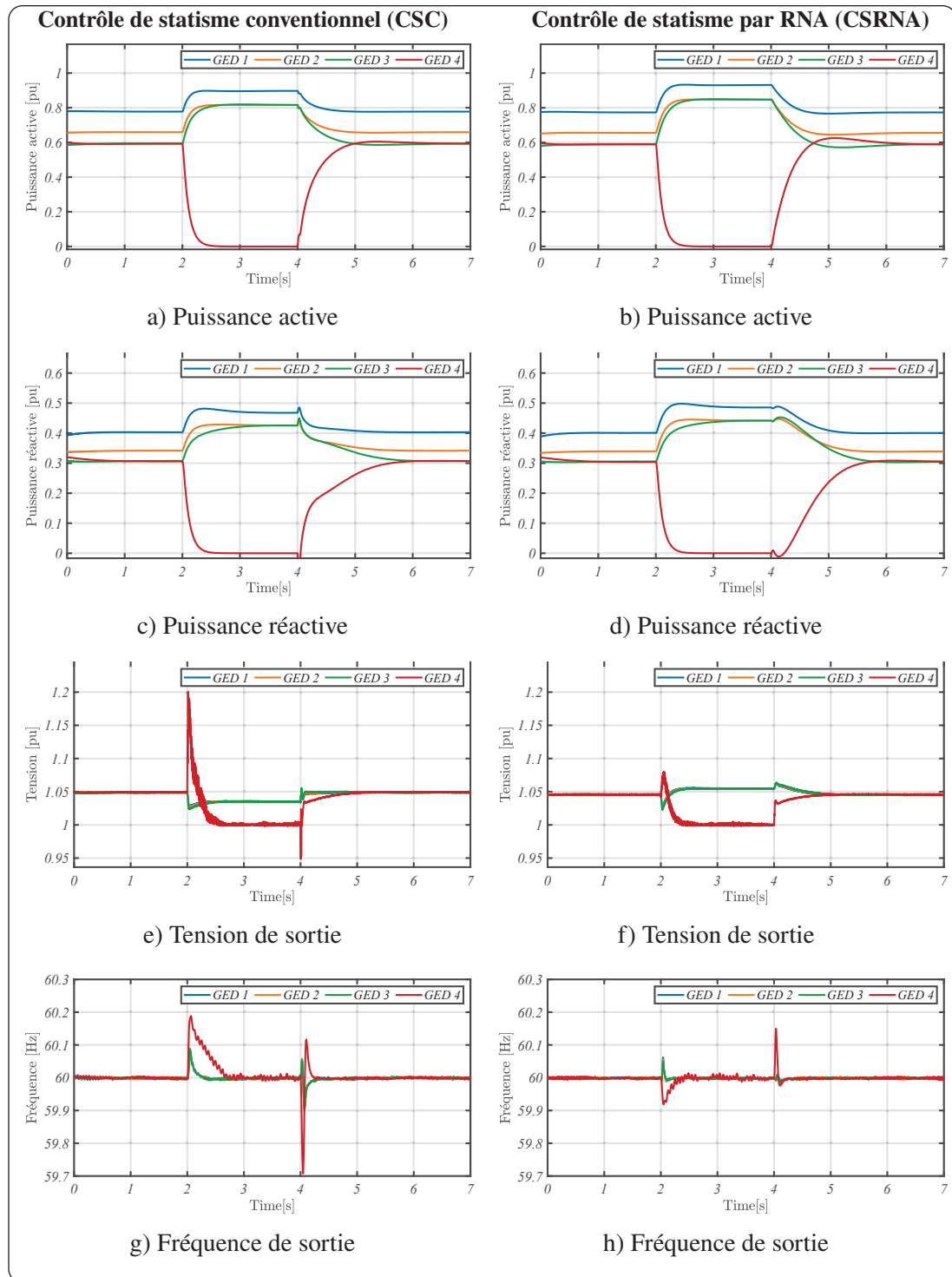


Figure 7.39 Comparaison entre le contrôle de statisme conventionnel et proposé pour une ligne mixte

Les caractéristiques spécifiques de la structure maillée se manifestent particulièrement dans la gestion des transitoires. Le CSRNA exploite efficacement la redondance des chemins de distribution d'énergie, permettant une adaptation souple aux changements topologiques du réseau. Cette flexibilité accrue se traduit par une meilleure stabilité des tensions de sortie (maintien à $\pm 2\%$ de la valeur nominale), des courants de ligne (limitation des surintensités transitoires à 1.2 pu) et de la fréquence du réseau (déviations maximale de 0.1 Hz).

La résilience du système est notamment mise en évidence par sa capacité à maintenir une alimentation stable des charges critiques pendant les phases de reconfiguration. Le CSRNA assure une transition contrôlée entre les différents états du système, minimisant l'impact des perturbations sur les charges sensibles tout en maintenant une qualité de service optimale. Cette qualité de service est caractérisée par un taux de distorsion harmonique totale (TDH) inférieur à 5 % selon IEEE 519, une régulation de tension dans la bande $\pm 5\%$ conforme à EN 50160, une continuité de service avec interruptions inférieures à 200 ms et un facteur de puissance maintenu au-dessus de 0.95.

Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à une gestion plus efficace et plus résiliente des MRs intelligents, capables de s'adapter dynamiquement aux variations d'impédance et aux conditions de fonctionnement du réseau tout en maintenant une qualité de service optimale.

7.6 Conclusion

L'analyse approfondie des performances des techniques de contrôle de statisme dans les MRs a permis de valider par simulation la supériorité du CSRNA par rapport au CSC. Les résultats obtenus à travers des simulations exhaustives sous MATLAB/SIMULINK démontrent des améliorations significatives dans diverses configurations opérationnelles.

L'évaluation systématique des performances selon différentes configurations de MRs a mis en évidence des améliorations quantifiables dans plusieurs aspects critiques. L'intégration de charges linéaires et non linéaires, combinée à l'analyse des réponses aux variations topologiques, a fourni un cadre de validation par simulation représentatif des conditions réelles d'exploitation.

Les résultats quantitatifs démontrent une amélioration significative du contrôle tension-fréquence avec le CSRNA. Les déviations de tension ont été réduites à $\pm 0.5\%$ de la valeur nominale, tandis que les écarts fréquentiels ont été maintenus sous 0.15 Hz, représentant une amélioration notable par rapport au CSC. Cette stabilité accrue des paramètres électriques fondamentaux contribue directement à l'amélioration de la qualité de l'alimentation fournie aux charges.

L'analyse spectrale révèle une réduction systématique du TDH dans toutes les configurations testées. Cette amélioration de la qualité spectrale, particulièrement notable en présence de charges non linéaires, démontre la capacité du CSRNA à maintenir une haute qualité de l'énergie même dans des conditions de charge complexes. Les résultats montrent une réduction des harmoniques de courant et de tension pouvant atteindre plusieurs points de pourcentage selon les configurations.

La distribution de puissance entre les unités GED présente également des améliorations remarquables, avec des erreurs de partage réduites à moins de 0.5 %. Cette précision accrue dans la répartition de la charge s'accompagne d'une optimisation des flux énergétiques et d'une réduction significative des pertes système. La capacité du CSRNA à gérer efficacement les transitions lors des séquences de connexion/déconnexion des générateurs démontre sa robustesse face aux perturbations majeures du réseau.

L'adaptabilité du CSRNA aux différentes topologies de réseau constitue un avantage majeur. Dans la structure maillée, le système démontre une capacité particulière à exploiter la redondance des chemins de distribution, optimisant naturellement les flux de puissance et minimisant les pertes. Cette flexibilité opérationnelle, combinée à la robustesse du contrôle, ouvre des perspectives prometteuses pour l'intégration croissante des sources d'énergie distribuées dans les réseaux modernes.

Ces résultats valident non seulement l'efficacité de la méthode proposée, mais ouvrent également la voie à des applications pratiques dans des environnements énergétiques de plus en plus complexes. Les perspectives d'amélioration concernent principalement l'optimisation des

algorithmes d'apprentissage, l'extension du système à des réseaux de plus grande échelle et le développement de stratégies de contrôle hybrides intégrant des fonctionnalités prédictives.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette thèse a abordé la problématique complexe du contrôle des MRs basse tension dans un contexte de transition énergétique marqué par l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelable. Face aux limitations des approches conventionnelles de contrôle de statisme, particulièrement dans les réseaux à impédance mixte, une stratégie innovante combinant réseaux de neurones artificiels et optimisation par essaim de particules a été développée.

Le parcours scientifique suivi a permis d'établir une progression logique depuis l'identification des défis jusqu'à la validation par simulation des solutions proposées. L'analyse approfondie de l'état de l'art présentée au chapitre 1 a révélé les insuffisances des méthodes traditionnelles. Comme discuté dans la section 1.6, le contrôle de statisme conventionnel démontre une incapacité à gérer efficacement le couplage entre puissances active et réactive dans les réseaux basse tension, limitation qui s'accroît avec les variations d'impédance de ligne caractéristiques des MRs modernes. Cette limitation fondamentale a motivé le développement d'une approche adaptative capable de s'ajuster dynamiquement aux variations des conditions opérationnelles.

La modélisation mathématique développée dans le référentiel rotatif a fourni le cadre théorique nécessaire pour comprendre et quantifier les phénomènes de couplage. L'utilisation du SOGI-QSG pour la génération des composantes orthogonales et l'application de la transformation de Park ont permis d'établir des modèles précis pour les modes autonome et connecté au réseau. Ces modèles constituent une contribution significative à la compréhension des dynamiques complexes des convertisseurs monophasés dans les MRs.

Les objectifs initiaux de cette recherche ont été pleinement atteints, avec des résultats dépassant souvent les attentes initiales :

1. Amélioration de la stabilité du MRs : Les résultats des simulations démontrent une réduction remarquable des déviations de tension à tous les nœuds du MRs (bus commun, points de

connexion des GED et bornes des charges) à $\pm 0,2$ V autour de la valeur nominale de 110 V, contre ± 5 V pour le contrôle conventionnel. Cette amélioration de 96% dans la régulation de tension représente une avancée significative pour la protection des équipements sensibles. De même, les variations de fréquence au niveau de chaque unité GED interconnectée ont été limitées à $\pm 0,15$ Hz autour de 60 Hz, soit une amélioration de 62,5% par rapport aux méthodes traditionnelles, garantissant ainsi une meilleure synchronisation entre les sources distribuées.

2. Optimisation du partage de puissance : L'erreur de répartition de puissance entre les unités GED a été réduite à moins de 0,5%, représentant une amélioration de 93% par rapport aux 7% d'erreur typiques du contrôle conventionnel. Cette précision accrue garantit une utilisation optimale des ressources disponibles et prolonge la durée de vie des équipements par une répartition équilibrée des contraintes.

3. Amélioration de la qualité de l'énergie : Le CSRNA démontre une amélioration substantielle de la qualité de l'énergie fournie aux charges. L'atténuation des distorsions harmoniques s'observe de manière consistante pour l'ensemble des configurations de lignes et types de charges testées. Plus significativement, le CSRNA assure une régulation exceptionnelle de l'amplitude de tension, maintenant celle-ci proche de la valeur nominale même lors de l'ajout de charges non linéaires sévères, là où les méthodes conventionnelles présentent des chutes importantes pouvant compromettre le fonctionnement des équipements sensibles.

4. Robustesse face aux perturbations : La capacité du système à gérer les transitions dynamiques a été validée à travers des tests rigoureux de connexion/déconnexion. Les oscillations transitoires ont été réduites à ± 5 % avec le CSRNA contre ± 15 % pour le CSC, démontrant la résilience supérieure de l'approche proposée. Cette atténuation significative des perturbations transitoires prévient le déclenchement intempestif des protections et assure une continuité de service optimale.

L'approche hybride RNA-OEP a démontré son efficacité à travers les simulations numériques réalisées. La séparation entre l'optimisation hors ligne par OEP et le contrôle temps réel par RNA s'est révélée particulièrement judicieuse, permettant de combiner l'optimalité des solutions avec la rapidité d'exécution nécessaire au contrôle en temps réel.

L'OEP a démontré sa capacité à explorer efficacement l'espace des solutions pour générer des données d'entraînement de haute qualité. Les tensions de référence optimales obtenues couvrent un large spectre de conditions opérationnelles, assurant ainsi la robustesse du RNA face à des scénarios variés. Cette approche a permis de surmonter le défi traditionnel de l'acquisition de données représentatives pour l'entraînement des systèmes d'intelligence artificielle.

Le RNA, avec son architecture optimisée de 7 neurones dans la couche cachée, a prouvé sa capacité à généraliser les relations complexes entre les puissances mesurées et les tensions de référence requises. La validation croisée sur 10 configurations différentes a confirmé la stabilité et la fiabilité du modèle, avec des performances consistantes sur l'ensemble des scénarios testés en simulation.

8.1 Contributions scientifiques majeures

8.1.1 Contributions théoriques

Cette thèse apporte plusieurs contributions théoriques significatives au domaine du contrôle des MRs :

1. Modélisation avancée dans le référentiel rotatif : Le développement d'un cadre mathématique complet pour la modélisation des convertisseurs CC-CA monophasés dans le référentiel rotatif constitue une avancée notable. L'application du SOGI-QSG pour les systèmes monophasés et son intégration avec la transformation de Park offrent une nouvelle perspective pour l'analyse des phénomènes de couplage dans les MRs basse tension.

2. Stratégie de contrôle hybride innovante : La combinaison synergique des RNA et de l'OEP pour le contrôle de statisme représente une approche novatrice. La méthodologie proposée, utilisant l'OEP pour l'optimisation des variables de commande plutôt que des paramètres internes du RNA, constitue un changement de paradigme dans l'application de l'intelligence artificielle au contrôle des systèmes électriques.

3. Analyse approfondie des mécanismes de couplage : L'étude détaillée des interactions entre puissances active et réactive dans les réseaux à impédance mixte apporte une compréhension nouvelle des défis spécifiques aux MRs basse tension. Cette analyse théorique fournit les bases nécessaires pour le développement de stratégies de contrôle adaptées.

8.1.2 Contributions pratiques

Au-delà des aspects théoriques, cette recherche offre des contributions pratiques directement applicables :

1. Méthodologie de conception reproductible : La démarche systématique développée, depuis la modélisation jusqu'à la validation par simulation, fournit un cadre méthodologique complet pour la conception de contrôleurs avancés. Cette approche peut être adaptée à différentes configurations de MRs et types de sources d'énergie distribuée.

2. Amélioration quantifiable des performances : Les gains de performance démontrés - réduction de 96% des déviations de tension, amélioration de 93% du partage de puissance, atténuation de 67% des oscillations transitoires - offrent des arguments concrets pour l'adoption de cette technologie dans des applications réelles.

3. Solution sans communication : Le fonctionnement autonome du contrôleur, sans dépendance aux infrastructures de communication, représente un avantage pratique majeur pour

le déploiement dans des zones isolées ou pour des applications critiques nécessitant une haute fiabilité.

8.1.3 Impact sur le domaine

Les travaux présentés dans cette thèse contribuent à l'avancement du domaine à plusieurs niveaux :

1. Ouverture de nouvelles voies de recherche : L'application réussie de l'approche hybride RNA-OEP au contrôle de statisme ouvre la voie à l'exploration d'autres combinaisons de techniques d'intelligence artificielle pour résoudre les défis des réseaux électriques modernes.

2. Facilitation de l'intégration des énergies renouvelables : En améliorant significativement la stabilité et la qualité de l'énergie dans les MRs, cette recherche contribue directement à faciliter l'intégration massive des sources d'énergie renouvelable, soutenant ainsi les objectifs de transition énergétique.

3. Contribution à la normalisation : Les résultats obtenus, notamment en termes de qualité de l'énergie et de stabilité, s'alignent avec les exigences des normes internationales (IEEE 1547, EN 50160), facilitant ainsi l'adoption industrielle de ces technologies.

8.2 Recommandations

Sur la base des résultats de simulation obtenus et de l'analyse approfondie du comportement du CSRNA dans différentes configurations de MRs, les recommandations suivantes sont formulées pour guider les travaux futurs et l'implémentation pratique de la solution proposée.

8.2.1 Recommandations pour l'implémentation pratique

Les résultats de simulation obtenus démontrent la faisabilité du CSRNA, mais plusieurs aspects doivent être considérés pour une mise en œuvre réussie dans des conditions réelles.

1. Phase de déploiement progressif : Il est fortement recommandé d'adopter une approche de déploiement par étapes, commençant par des MRs de petite taille (2-3 unités GED) avant d'étendre à des systèmes plus complexes. Cette progression permettra de valider les performances en conditions réelles et d'ajuster les paramètres si nécessaire.

2. Dimensionnement approprié du système d'entraînement : La qualité des performances du RNA dépend directement de la représentativité des données d'entraînement. Il est essentiel de collecter des données couvrant au minimum 95% des conditions opérationnelles attendues, incluant les variations d'impédance de ligne (inductive, résistive et mixte) observées dans cette étude. De plus, les ensembles de données doivent être générés avec l'OEP pour chaque configuration spécifique de MR en tenant compte de la topologie (bus commun ou maillée), des types de charges (linéaires et non linéaires) et des impédances de ligne. Une phase de validation avec des scénarios non inclus dans l'entraînement permettra d'évaluer la capacité de généralisation du RNA et d'identifier les limites du modèle.

3. Validation : Les résultats de simulation présentés dans ce travail constituent une première validation théorique qui doit être complétée par des tests sur banc d'essai Hardware-in-the-Loop (HIL) pour valider le comportement en temps réel du contrôleur. Ces tests HIL permettront de vérifier la robustesse du système face aux retards de calcul et aux contraintes matérielles. Par la suite, des essais sur prototype à échelle réduite s'avèrent nécessaires avant tout déploiement en conditions réelles. Une caractérisation précise des temps de calcul sur les plateformes matérielles cibles (DSP, FPGA ou microcontrôleurs embarqués) permettra de confirmer la faisabilité d'une implémentation temps réel avec une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz.

8.2.2 Recommandations pour l'optimisation des performances

L'étude a démontré la supériorité du CSRNA dans les configurations testées, mais plusieurs pistes d'optimisation peuvent être explorées pour maximiser les bénéfices de cette approche.

1. Adaptation aux caractéristiques du réseau cible : Les résultats ont clairement démontré la sensibilité du système aux variations d'impédance de ligne. Il est donc primordial de caractériser précisément les impédances de ligne du réseau cible par des mesures sur site avant le déploiement. Cette caractérisation permettra d'ajuster les plages de variation des coefficients de statisme (m_p , n_q) optimisés par l'OEP selon les conditions réelles du réseau. De plus, l'architecture du RNA (nombre de couches cachées, nombre de neurones par couche) devrait être adaptée en fonction de la complexité de la topologie du MR et du nombre d'unités GED interconnectées.

2. Extension à d'autres configurations : Les travaux présentés se sont limités à des configurations avec quatre unités GED interconnectées selon deux topologies (bus commun et maillée). Les recherches futures devraient explorer des configurations avec un nombre variable d'unités GED pour évaluer la scalabilité de l'approche. L'investigation de topologies hybrides combinant structures radiales et maillées permettrait de mieux représenter les architectures de MRs réels. Par ailleurs, l'intégration de systèmes de stockage d'énergie (batteries, supercondensateurs) et la gestion coordonnée de sources renouvelables intermittentes (photovoltaïque, éolien) constituent des extensions naturelles de ce travail qui amélioreraient la pertinence pratique de la solution.

3. Amélioration de la robustesse face aux incertitudes : Les simulations ont été réalisées avec des paramètres fixes du MR. Dans la pratique, ces paramètres évoluent au cours du temps en raison du vieillissement des équipements, des variations de température et des changements dans la configuration du réseau. Le développement de stratégies de contrôle adaptatif permettant au CSRNA de gérer ces variations temporelles améliorerait significativement la robustesse

du système. L'intégration de mécanismes de détection et d'isolation des défauts renforcerait également la résilience du MR. Finalement, une évaluation des performances sous des conditions de charge extrêmes non couvertes par cette étude (déséquilibres sévères, défauts asymétriques) s'avère nécessaire pour garantir la fiabilité du système dans toutes les situations opérationnelles.

8.2.3 Recommandations méthodologiques

Les choix méthodologiques effectués dans cette recherche ont permis d'obtenir des résultats prometteurs, mais plusieurs améliorations peuvent être envisagées pour les travaux futurs.

1. Optimisation de l'approche hybride RNA-OEP : L'utilisation de l'optimisation par essaim de particules pour l'entraînement du RNA s'est révélée efficace, mais d'autres algorithmes d'optimisation métaheuristique mériteraient d'être explorés. Les algorithmes génétiques, l'optimisation par colonies de fourmis ou les algorithmes d'optimisation hybrides pourraient offrir de meilleures performances ou une convergence plus rapide. Pour des systèmes de plus grande échelle, l'investigation de techniques d'apprentissage profond (Deep Learning) avec architectures plus complexes (réseaux convolutifs, réseaux récurrents) pourrait améliorer la capacité de généralisation. Par ailleurs, le développement de méthodes de compression et de quantification des réseaux de neurones faciliterait l'implémentation sur des contrôleurs embarqués à ressources limitées tout en maintenant des performances acceptables.

2. Analyse comparative approfondie : Cette étude a comparé le CSRNA avec le contrôle de statisme conventionnel. Une comparaison étendue avec d'autres approches avancées telles que le contrôle prédictif basé sur modèle (MPC), la commande robuste H-infini ou les techniques de contrôle par mode glissant permettrait de mieux positionner la solution proposée dans le paysage des méthodes de contrôle existantes. Une évaluation quantitative du compromis entre complexité algorithmique et amélioration des performances aiderait à justifier le choix du CSRNA pour des applications spécifiques. De plus, une analyse de sensibilité systématique aux variations

des paramètres du MR (impédances de ligne, capacités des filtres, inductances) permettrait d'identifier les limites de l'approche et les conditions optimales d'application.

3. Validation selon les normes internationales : Bien que les résultats aient démontré des performances prometteuses, une vérification rigoureuse de la conformité avec les normes internationales s'impose. La conformité avec la norme IEEE 1547 concernant l'interconnexion des ressources distribuées doit être vérifiée dans des conditions de fonctionnement variées, incluant les modes îloté et connecté au réseau principal. Le respect des critères de qualité de la puissance selon la norme IEEE 519 (limites de distorsion harmonique) et EN 50160 (caractéristiques de la tension d'alimentation) doit être évalué pour différents profils de charge. Finalement, l'analyse du comportement lors des transitions entre modes de fonctionnement et lors d'événements transitoires (courts-circuits, déconnexions intempestives) selon les exigences normatives garantira l'acceptabilité de la solution pour un déploiement à grande échelle.

8.3 Perspectives de recherche

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent plusieurs pistes prometteuses pour des recherches futures, allant des extensions immédiates aux développements à plus long terme. Cette section présente les principales directions d'investigation identifiées.

8.3.1 Extensions immédiates

Les travaux futurs immédiats devraient se concentrer sur les extensions naturelles de la recherche actuelle, permettant d'élargir le domaine d'application et d'améliorer la pertinence pratique de l'approche proposée.

1. Extension aux systèmes triphasés : L'adaptation de la méthodologie proposée aux convertisseurs triphasés représente une évolution logique et nécessaire pour les applications industrielles. Cette extension nécessitera de relever plusieurs défis spécifiques, notamment la

gestion du déséquilibre entre phases qui constitue une problématique absente dans les systèmes monophasés étudiés. L'architecture du RNA devra être optimisée pour traiter la complexité accrue liée aux trois phases, passant potentiellement de deux entrées (puissances active et réactive) à six entrées (puissances par phase). L'algorithme OEP devra également être adapté pour explorer un espace de recherche élargi, avec des coefficients de statisme potentiellement différents pour chaque phase afin de compenser les déséquilibres. Cette extension permettrait de valider l'approche CSRNA dans des configurations plus représentatives des réseaux de distribution réels.

2. Intégration de systèmes de stockage d'énergie : L'incorporation de systèmes de stockage d'énergie (batteries lithium-ion, supercondensateurs, volants d'inertie) représente une extension majeure qui enrichirait considérablement les fonctionnalités du MR. Cette intégration nécessitera le développement de stratégies de gestion optimale de l'état de charge tenant compte des contraintes de cyclage et de la dégradation des batteries. L'architecture du RNA devra être étendue pour inclure de nouvelles entrées représentant l'état de charge, les puissances de charge/décharge et les contraintes temporelles. L'optimisation par OEP devra intégrer des objectifs multiples incluant la minimisation des coûts opérationnels, la maximisation de la durée de vie des batteries et l'optimisation de l'efficacité énergétique globale. Cette extension permettrait d'explorer des stratégies de lissage de la production renouvelable et d'écêtement des pointes de consommation.

3. Coordination de MRs interconnectés : L'étude actuelle s'est limitée à un MR isolé, mais la réalité opérationnelle future impliquera probablement la coordination de plusieurs MRs interconnectés. Cette problématique ouvre des perspectives intéressantes pour le développement d'architectures hiérarchiques de contrôle où chaque MR maintient son autonomie locale tout en participant à une optimisation globale. Le développement de stratégies de négociation inter-MRs pour l'échange d'énergie nécessitera l'extension du CSRNA pour inclure des mécanismes

de communication et de décision distribuée. Cette approche pourrait s'inspirer des systèmes multi-agents où chaque MR est représenté par un agent intelligent capable de négocier avec ses voisins tout en respectant ses propres contraintes opérationnelles.

8.3.2 Développements méthodologiques avancés

À moyen terme, plusieurs axes de développement méthodologique méritent d'être explorés pour améliorer les performances et étendre les capacités de l'approche proposée.

1. Techniques d'intelligence artificielle avancées : L'architecture RNA relativement simple utilisée dans cette étude (réseau feedforward avec une couche cachée) pourrait être remplacée par des architectures d'apprentissage profond plus sophistiquées pour améliorer la capacité de modélisation de systèmes complexes. Les réseaux de neurones récurrents (RNN) ou les réseaux LSTM pourraient exploiter les dépendances temporelles dans les données pour améliorer les prédictions. L'apprentissage par renforcement représente également une piste prometteuse pour développer des contrôleurs capables d'adaptation en ligne, apprenant continuellement des interactions avec le MR sans nécessiter de phase de ré-entraînement hors ligne. Toutefois, ces approches devront être accompagnées du développement de méthodes d'IA explicable pour améliorer la confiance des opérateurs et faciliter la certification des systèmes critiques.

2. Optimisation multi-objectifs sophistiquée : L'approche OEP actuelle optimise principalement les coefficients de statisme pour minimiser l'erreur de partage de puissance. Une extension vers l'optimisation multi-objectifs permettrait d'intégrer simultanément des critères économiques (minimisation des coûts opérationnels), de fiabilité (maximisation de la durée de vie des équipements) et de qualité de l'énergie (minimisation du THD). Le développement d'algorithmes hybrides combinant l'OEP avec d'autres métaheuristiques (algorithmes génétiques, optimisation par colonies de fourmis) pourrait améliorer la vitesse de convergence et la qualité des solutions. Par ailleurs, l'intégration de techniques d'optimisation robuste

permettrait de considérer explicitement les incertitudes paramétriques du MR, garantissant des performances acceptables même en présence de variations importantes des paramètres réels par rapport aux valeurs nominales.

3. Validation formelle et garanties de stabilité : Un défi majeur pour l'adoption industrielle des contrôleurs basés sur l'IA réside dans l'absence de garanties formelles de stabilité. Le développement de méthodes de vérification formelle permettant de prouver mathématiquement la stabilité du système contrôlé par le CSRNA dans toutes les conditions opérationnelles constituerait une avancée significative. L'application de la théorie de Lyapunov pour dériver des conditions de stabilité vérifiables, combinée avec des techniques d'analyse d'accessibilité pour explorer l'espace d'états du système, pourrait fournir ces garanties. Cette direction de recherche est essentielle pour la certification des systèmes critiques et l'acceptation réglementaire des contrôleurs intelligents dans les infrastructures énergétiques.

8.3.3 Défis de recherche identifiés

Plusieurs défis techniques et scientifiques fondamentaux restent à relever pour permettre le déploiement à grande échelle de l'approche proposée.

1. Scalabilité et complexité computationnelle : L'étude actuelle s'est limitée à quatre unités GED interconnectées, mais les MRs réels peuvent intégrer des dizaines voire des centaines de sources distribuées. Le développement d'algorithmes efficaces capables de gérer cette complexité accrue tout en maintenant des temps de calcul compatibles avec le contrôle temps réel constitue un défi majeur. Les techniques de réduction de modèle, permettant de simplifier la représentation du système tout en préservant ses caractéristiques essentielles pour le contrôle, méritent d'être explorées. De plus, l'investigation d'architectures de calcul distribué où chaque unité GED dispose de son propre contrôleur CSRNA coordonné avec les autres pourrait permettre de distribuer la charge computationnelle et d'améliorer la scalabilité.

2. Robustesse face aux incertitudes et aux perturbations : Les simulations ont été réalisées dans un environnement contrôlé avec des paramètres précisément connus. Dans la pratique, les MRs sont soumis à de nombreuses incertitudes (variations des paramètres des lignes, imprécisions de mesure, perturbations non modélisées) et à des événements imprévisibles (défauts, déconnexions intempestives). Le développement de mécanismes robustes de détection et de récupération des défaillances, capables de maintenir la stabilité et la qualité de service même dans ces conditions dégradées, s'avère crucial. L'intégration de techniques de contrôle robuste (H-infini, μ -synthèse) avec l'approche CSRNA pourrait améliorer significativement la résilience du système.

3. Interopérabilité et standardisation : L'adoption à grande échelle de contrôleurs intelligents basés sur l'IA nécessitera le développement de standards définissant les interfaces, les protocoles de communication et les formats d'échange de données. Le développement de standards pour l'échange et la portabilité des modèles RNA entre différentes plateformes matérielles et logicielles faciliterait le déploiement multi-vendeurs. Par ailleurs, l'établissement de protocoles de communication sécurisés et efficaces, spécialement conçus pour les contrôleurs distribués basés sur l'IA, garantirait l'intégrité et la confidentialité des données tout en minimisant les latences. La participation active de la communauté de recherche aux comités de normalisation internationaux (IEC, IEEE) permettrait d'influencer favorablement l'évolution des standards pour accommoder ces nouvelles technologies.

8.4 Mot de la fin

Cette thèse représente une contribution significative à l'évolution des systèmes de contrôle pour les MRs, démontrant comment l'intelligence artificielle peut révolutionner la gestion de l'énergie électrique. Les résultats obtenus confirment non seulement la faisabilité technique de l'approche proposée, mais révèlent également son potentiel transformateur pour l'industrie électrique.

L'aventure scientifique qui s'achève ici n'est que le début d'une transformation plus large. Les concepts développés, les méthodologies établies et les résultats obtenus constituent des fondations solides sur lesquelles de futures innovations pourront s'édifier. Dans un contexte de transition énergétique urgente, ces travaux apportent des solutions concrètes pour faciliter l'intégration massive des énergies renouvelables tout en maintenant la stabilité et la qualité de l'approvisionnement électrique.

Le chemin parcouru, depuis l'identification des limitations des approches conventionnelles jusqu'à la validation par simulation d'une solution innovante, illustre la puissance de l'approche interdisciplinaire combinant génie électrique et intelligence artificielle. Cette synergie ouvre des horizons prometteurs pour relever les défis énergétiques du XXI^e siècle.

Puissent ces travaux inspirer de nouvelles recherches, catalyser des innovations industrielles et contribuer, même modestement, à la construction d'un avenir énergétique plus durable et résilient. L'énergie est le moteur de notre civilisation ; son contrôle intelligent est la clé de notre avenir collectif.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbasipour, M., Igder, M. A. & Liang, X. (2021). A Novel Hybrid Neural Network-Based Day-Ahead Wind Speed Forecasting Technique. *IEEE Access*, 9, 151142-151154. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3126747.
- Abdolmaleki, B., Shafiee, Q., Seifi, A. R., Arefi, M. M. & Blaabjerg, F. (2020). A Zeno-Free Event-Triggered Secondary Control for AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), 1905-1916. doi : 10.1109/TSG.2019.2945250.
- Abdolrasol, M. G. M., Mohamed, R., Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Mansor, M. & Blaabjerg, F. (2021). Artificial Neural Network Based Particle Swarm Optimization for Microgrid Optimal Energy Scheduling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(11), 12151-12157. doi : 10.1109/TPEL.2021.3074964.
- Abianeh, A. J., Mardani, M. M., Ferdowsi, F., Gottumukkala, R. & Dragičević, T. (2022). Cyber-Resilient Sliding-Mode Consensus Secondary Control Scheme for Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(5), 6074-6089. doi : 10.1109/TPEL.2021.3125985.
- Abu-Rub, H., Malinowski, M. & Al-Haddad, K. (2014). *Power electronics for renewable energy systems, transportation, and industrial applications*. Wiley/IEEE.
- Adya, M. & Collopy, F. (1998). How effective are neural networks at forecasting and prediction ? A review and evaluation. *Journal of forecasting*, 17(5-6), 481–495.
- Agence Internationale de l'Énergie. [Consulté le 15 décembre 2024]. (2022). Renewables 2022. Repéré à <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>.
- Agence Internationale de l'Énergie. [Consulté le 15 décembre 2024]. (2024). World Energy Outlook 2024 : Executive Summary. Repéré à <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary?language=fr>.
- Agundis Tinajero, G. D., Nasir, M., Vasquez, J. C. & Guerrero, J. M. (2021). Comprehensive power flow modelling of hierarchically controlled AC/DC hybrid islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 127, 106629. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106629>.
- Ahmadi, M. (2011). Application of neural network for the prediction of blast-induced ground vibration and optimization of blasting parameters. *Journal of Mining & Environment*, 2(1), 31–42.

- Ahmadi, S., Shokoohi, S. & Bevrani, H. (2015). A fuzzy logic-based droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in an AC microgrid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, 148–155. doi : 10.1016/j.ijepes.2014.07.024.
- Al Yammahi, H. & Ai-Hinai, A. (2015). Intelligent frequency control using optimal tuning and demand response in an AC microgrid. *2015 International Conference on Solar Energy and Building (ICSobEB)*, pp. 1-5. doi : 10.1109/ICSobEB.2015.7244943.
- Ali, M. K., Abbas, M., Othman, M., Nor, M. H. & Ahmad, Z. (2017). Neural network modeling of aerobic granular sludge process : A systematic approach. *Journal of Environmental Management*, 201, 233–242.
- Altinay, O. & Tulunay, Y. (1997). A neural network approach to earthquake prediction. *Geophysical Research Letters*, 24(21), 2715–2718.
- Amari, S.-i. (1993). Backpropagation and stochastic gradient descent method. *Neurocomputing*, 5(4-5), 185–196.
- Aptula, A. O., Jeliaskova, N. G., Schultz, T. W. & Cronin, M. T. (2005). The better predictive model : high q^2 for the training set or low root mean square error of prediction for the test set ? *QSAR & Combinatorial Science*, 24(3), 385–396.
- Arunima, S. & Subudhi, B. (2024). An Observer-Based Distributed Cooperative Event-Triggered Control Scheme for an AC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(6), 5321-5330. doi : 10.1109/TSG.2024.3412728.
- Ashabani, M., Mohamed, Y. A.-R. I., Mirsalim, M. & Aghashabani, M. (2015). Multivariable Droop Control of Synchronous Current Converters in Weak Grids/Microgrids With Decoupled Axes Currents. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1610–1620. doi : 10.1109/tsg.2015.2392373.
- Ashtiani, N. A., Khajehoddin, S. A. & Karimi-Ghartemani, M. (2022). Modeling and Stability Analysis of Single-Phase Microgrids Controlled in Stationary Frame. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(7), 7759-7774. doi : 10.1109/TPEL.2022.3147157.
- Askarian, I., Eren, S., Pahlevani, M. & Knight, A. M. (2018). Digital Real-Time Harmonic Estimator for Power Converters in Future Micro-Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6398–6407. doi : 10.1109/tsg.2017.2711016.
- Asl, E. S., Babaei, E., Sabahi, M., Hasan Babayi Nozadian, M. & Cecati, C. (2018). New Half-Bridge and Full-Bridge Topologies for a Switched-Boost Inverter With Continuous Input Current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 3188-3197. doi : 10.1109/TIE.2017.2752118.

- Ay, M. & Kişi. (2017). Modeling of dissolved oxygen concentration using different neural network techniques in Foundation Creek, El Paso County, Colorado. *Journal of Environmental Engineering*, 143(6), 04017017.
- Babaiahgari, B., Ullah, M. H. & Park, J.-D. (2019). Coordinated control and dynamic optimization in DC microgrid systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 113, 832-841.
- Badar, M., Ahmad, I., Rehman, S., Nazir, S. & Waqas, A. (2022). Hierarchical control of hybrid direct current microgrid with variable structure based sliding mode control and fuzzy energy management system. *Journal of the Franklin Institute*, 359(13), 6856-6892. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.06.044>.
- Baghaee, H. R., Mirsalim, M. & Gharehpetian, G. B. (2018). Performance Improvement of Multi-DER Microgrid for Small- and Large-Signal Disturbances and Nonlinear Loads : Novel Complementary Control Loop and Fuzzy Controller in a Hierarchical Droop-Based Control Scheme. *IEEE Systems Journal*, 12(1), 444-451. doi : 10.1109/JSYST.2016.2580617.
- Bal, H. & Buyle-Bodin, F. (2013). Water quality prediction using neural networks and neuro-fuzzy systems. *Water Science and Technology*, 68(6), 1351–1358.
- Basma, A. A. & Kallas, N. (2004). Modeling soil collapse by artificial neural networks. *Geotechnical & Geological Engineering*, 22(3), 427–438.
- Behera, M., Saikia, L., Ramoji, S., Dekaraja, B. & Bhagat, S. (2022). A Novel Decentralized FO Voltage and Current Control Scheme for Voltage and Frequency Regulation in Inverter Dominated Islanded Microgrids Using Improved Droop Control. *IFAC-PapersOnLine*, 55(1), 679-684. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.111>. 7th International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS 2022.
- Behrang, M. A., Assareh, E., Ghanbarzadeh, A. & Noghrehabadi, A. R. (2010). The potential of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global solar radiation modeling based on meteorological data. *Solar Energy*, 84(8), 1468–1480.
- Belgana, S. & Fortin-Blanchette, H. (2024). A Novel Neural Network-Based Droop Control Strategy for Single-Phase Power Converters. *Energies*, 17(23), 5825. doi : 10.3390/en17235825.
- Belgrano, A., Malmgren, B. & Lindahl, O. (2002). Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. *Ecological Modelling*, 146(1-3), 1–7.

- Beus, M., Banis, F., Pandžić, H. & Poulsen, N. K. (2020). Three-level hierarchical microgrid control—model development and laboratory implementation. *Electric Power Systems Research*, 189, 106758. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106758>.
- Bevrani, H. (2014a). *Robust Power System Frequency Control*. Springer.
- Bevrani, H. (2014b). Frequency Control in Microgrids. Dans *Robust Power System Frequency Control* (pp. 319–347). Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-07278-4_11.
- Bevrani, H., Watanabe, M. & Mitani, Y. (2014). *Power System Monitoring and Control*. Wiley-IEEE Press.
- Bevrani, H., Feizi, M. R. & Ataee, S. (2015). Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid : H infinity and mu-Synthesis Approaches. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1–1. doi : 10.1109/tsg.2015.2446984.
- Bevrani, H., Francois, B. & Ise, T. (2017a). *Microgrid Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, Inc. doi : 10.1002/9781119263739.
- Bevrani, H., Francois, B. & Ise, T. (2017b). *Microgrid Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Bevrani, H., Francois, B. & Ise, T. (2017c). *Microgrid Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc. doi : 10.1002/9781119263739.
- Bhattacharai, R., Gurung, N. & Kamalasadan, S. (2018). Dual Mode Control of a Three-Phase Inverter Using Minimum Variance Adaptive Architecture. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3868–3880. doi : 10.1109/TIA.2018.2826469.
- Bi, H.-S., Cai, J.-J. & Zhang, J. (2005). A hybrid neural network approach for water quality monitoring in the northern Gulf of Mexico. *Science in China Series D*, 48(10), 1693–1700.
- Bidram, A., Nasirian, V., Davoudi, A. & Lewis, F. L. (2017). Droop-Free Distributed Control of AC Microgrids. Dans *Cooperative Synchronization in Distributed Microgrid Control* (pp. 141–171). Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-50808-5_6.
- Billah, M., Yousif, M., Numan, M., Salam, I. U., Kazmi, S. A. A. & Alghamdi, T. A. H. (2023). Decentralized Smart Energy Management in Hybrid Microgrids : Evaluating Operational Modes, Resources Optimization, and Environmental Impacts. *IEEE Access*, 11, 143530–143548. doi : 10.1109/ACCESS.2023.3343466.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press.

- Bisht, R., Subramaniam, S., Bhattarai, R. & Kamalasadan, S. (2018, sep). Adaptive Minimum Variance Control of Grid Connected Single Phase Inverters in Synchronously Rotating DQ Reference Frame. *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. doi : 10.1109/ias.2018.8544589.
- Bouزيد, A. E. M., Sicard, P., Yamane, A. & Paquin, J.-N. (2016a, nov). Simulation of droop control strategy for parallel inverters in autonomous AC microgrids. *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. doi : 10.1109/icmic.2016.7804202.
- Bouزيد, A. E. M., Alonso, C. & Beral, G. (2025). Challenges of operating multiple distributed generators with different primary control strategies in microgrids : Interactions and performance assessment. *Mathematics and Computers in Simulation*. doi : 10.1016/j.matcom.2025.08.029. Article sous presse.
- Bouزيد, A. M., Guerrero, J. M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P. & Benghanem, M. (2015). A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 751-766.
- Bouزيد, A. M., Sicard, P., Paquin, J.-N. & Yamane, A. (2016b, jun). A robust control strategy for parallel-connected distributed generation using real-time simulation. *2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. doi : 10.1109/pedg.2016.7527055.
- Brandao, D. I., Ferreira, W. M., Alonso, A. M. S., Tedeschi, E. & Marafão, F. P. (2020). Optimal Multiobjective Control of Low-Voltage AC Microgrids : Power Flow Regulation and Compensation of Reactive Power and Unbalance. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2), 1239-1252. doi : 10.1109/TSG.2019.2933790.
- Cao, S., Lu, W. & Xu, Q. (2015). A comprehensive survey on geometric deep learning. *IEEE Access*, 8, 35929-35949.
- Cao, W., Ma, Y., Wang, F., Tolbert, L. M. & Xue, Y. (2020). Low-Frequency Stability Analysis of Inverter-Based Islanded Multiple-Bus AC Microgrids Based on Terminal Characteristics. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(5), 3662-3676. doi : 10.1109/TSG.2020.2978250.
- Cao, Y., Zhang, H., Li, W., Zhou, M., Zhang, Y. & Chaovaitwongse, W. A. (2018). Comprehensive learning particle swarm optimization algorithm with local search for multimodal functions. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 23(4), 718-731.
- Castilla, M., de Vicuna, L. G. & Miret, J. (2018). Control of Power Converters in AC Microgrids. Dans *Microgrids Design and Implementation* (pp. 139-170). Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-98687-6_5.

- Castro, R. (2022). *Electricity Production from Renewables*. Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-030-82416-7.
- Chai, T. & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) ?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247–1250.
- Chakraborty, S. & Kar, S. (2023). Hierarchical control of networked microgrid with intelligent management of TCLs : A case study approach. *Electric Power Systems Research*, 224, 109787. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109787>.
- Chen, M., Ye, Z., Chen, Y. & Xu, D. (2021). Zero-Voltage-Switching Single-Phase Full-Bridge Inverter With Active Power Decoupling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(1), 571–582. doi : 10.1109/TPEL.2020.2998640.
- Cheng, R., Nian, R., He, B., Wang, X. & Zhou, M. (2018). Data-driven predictive control for blast furnace. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 2107–2115.
- Chu, C.-C. & Iu, H. H.-C. (2017). Complex Networks Theory For Modern Smart Grid Applications : A Survey. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 7(2), 177–191. doi : 10.1109/jetcas.2017.2692243.
- Chu, Y., Fei, J. & Hou, S. (2020). Adaptive Global Sliding-Mode Control for Dynamic Systems Using Double Hidden Layer Recurrent Neural Network Structure. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(4), 1297–1309. doi : 10.1109/TNNLS.2019.2919676.
- Clerc, M. & Kennedy, J. (2002). The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58–73. doi : 10.1109/4235.985692.
- Dagar, A., Gupta, P. & Niranjana, V. (2021). Microgrid protection : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111401.
- Dahl, G. E., Sainath, T. N. & Hinton, G. E. (2013). Improving deep neural networks for LVCSR using rectified linear units and dropout. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 8609–8613.
- Dash, A., Bagarty, D. P., Hota, P. K., Behera, R. K., Muduli, U. R. & Al Hosani, K. (2021). DC-Offset Compensation for Three-Phase Grid-Tied SPV-DSTATCOM Under Partial Shading Condition With Improved PR Controller. *IEEE Access*, 9, 132215–132224. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3115122.

- de Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B. & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38–48.
- Deng, F., Petucco, A., Mattavelli, P. & Zhang, X. (2022). An enhanced current sharing strategy for islanded ac microgrids based on adaptive virtual impedance regulation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 134, 107402. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107402>.
- Deng, S., Chen, L., Lu, X., Zheng, T. & Mei, S. (2021). Distributed Finite-Time Secondary Frequency Control of Islanded Microgrids With Enhanced Operational Flexibility. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(3), 1733–1742. doi : 10.1109/TEC.2021.3054780.
- Deng, Y., Tao, Y., Chen, G., Li, G. & He, X. (2017). Enhanced Power Flow Control for Grid-Connected Droop-Controlled Inverters With Improved Stability. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5919–5929. doi : 10.1109/tie.2016.2606081.
- Ding, M., Tao, Z., Hu, B., Tan, S. & Yokoyama, R. (2024). Parallel Operation Strategy of Inverters Based on an Improved Adaptive Droop Control and Equivalent Input Disturbance Approach. *Electronics*, 13(3), 486. doi : 10.3390/electronics13030486.
- Ding, S., Su, C. & Yu, J. (2011). An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 36(2), 153–162.
- Drucker, H., Schapire, R. & Simard, P. (1993). Improving regressors using boosting techniques. *International Conference on Machine Learning*, 107–115.
- Dündar, S. & Şahin, Y. (2013). The use of neural networks for the prediction of the critical buckling load of helical compression springs. *Applied Soft Computing*, 13(4), 1906–1918.
- Eajal, A. A., El-Awady, A., El-Saadany, E. F., Ponnambalam, K., Al-Durra, A., Al-Sumaiti, A. S. & Salama, M. M. A. (2021). A Bayesian Approach to the Reliability Analysis of Renewables-Dominated Islanded DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4296–4309. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3056314.
- El Moubarek Bouzid, A., Sicard, P., Yamane, A. & Paquin, J.-N. (2016). Simulation of droop control strategy for parallel inverters in autonomous AC microgrids. *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, pp. 701–706. doi : 10.1109/ICMIC.2016.7804202.
- El Tabach, E., Lancelot, L., Shahrour, I. & Najjar, Y. (2007). Use of artificial neural network simulation metamodeling to assess groundwater contamination in a road project. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 766–776.

- Elgamal, M., Korovkin, N., Abdel Menaem, A. & Elmitwally, A. (2022). An algorithm for power flow analysis in isolated hybrid energy microgrid considering DG droop model and virtual impedance control loop. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100875. doi : <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100875>.
- Espina, E., Llanos, J., Burgos-Mellado, C., Cárdenas-Dobson, R., Martínez-Gómez, M. & Sáez, D. (2020). Distributed Control Strategies for Microgrids : An Overview. *IEEE Access*, 8, 193412-193448.
- Fan, B., Li, Q., Wang, W., Yao, G., Ma, H., Zeng, X. & Guerrero, J. M. (2022). A Novel Droop Control Strategy of Reactive Power Sharing Based on Adaptive Virtual Impedance in Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(11), 11335-11347. doi : 10.1109/TIE.2021.3123660.
- Fani, B., Shahgholian, G., Haes Alhelou, H. & Siano, P. (2022). Inverter-based islanded microgrid : A review on technologies and control. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2, 100068.
- Feng, F. & Zhang, P. (2020). Enhanced Microgrid Power Flow Incorporating Hierarchical Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3), 2463-2466. doi : 10.1109/TPWRS.2020.2972131.
- Feng, F., Zhang, P., Zhou, Y. & Wang, L. (2023). Distributed Networked Microgrids Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(2), 1405-1419. doi : 10.1109/TPWRS.2022.3175933.
- Garces, A. (2020). Small-signal stability in island residential microgrids considering droop controls and multiple scenarios of generation. *Electric Power Systems Research*, 185, 106371. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106371>.
- Geng, G., Ajjarapu, V. & Jiang, Q. (2015, jul). A hybrid dynamic optimization approach for stability constrained optimal power flow. *2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. doi : 10.1109/pesgm.2015.7285768.
- Gholami, V. & Fakhari, M. H. (2017). Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 529, 1060–1069.
- Ghritlahre, H. K. & Prasad, R. K. (2017). Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 75–88.

- Ghritlahre, H. K. & Prasad, R. K. (2018). Investigation of thermal performance of unidirectional flow porous bed solar air heater using MLP, GRNN, and RBF models of ANN technique. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 226-235. doi : <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.006>.
- Gnana Sheela, K. & Deepa, S. N. (2013). Review on methods to fix number of hidden neurons in neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 425740. doi : [10.1155/2013/425740](https://doi.org/10.1155/2013/425740).
- Golsorkhi, M. S. & Savaghebi, M. (2021). A Decentralized Control Strategy Based on V-I Droop for Enhancing Dynamics of Autonomous Hybrid AC/DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(8), 9430-9440. doi : [10.1109/TPEL.2021.3049813](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3049813).
- Gomez, L. A. G., Lourenco, L. F. N., Grilo, A. P., Salles, M. B. C., Meegahapola, L. & Filho, A. J. S. (2020). Primary Frequency Response of Microgrid Using Doubly Fed Induction Generator With Finite Control Set Model Predictive Control Plus Droop Control and Storage System. *IEEE Access*, 8, 189298–189312. doi : [10.1109/access.2020.3031544](https://doi.org/10.1109/access.2020.3031544).
- Gong, K., Shi, J., Liu, Y., Wang, Z., Ren, L. & Zhang, Y. (2016). Application of SMES in the Microgrid Based on Fuzzy Control. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(3), 1–5. doi : [10.1109/tasc.2016.2524446](https://doi.org/10.1109/tasc.2016.2524446).
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G. & Castilla, M. (2011a). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. doi : [10.1109/TIE.2010.2066534](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534).
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G. & Castilla, M. (2011b). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172. doi : [10.1109/TIE.2010.2066534](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534).
- Guillod, T., Papamanolis, P. & Kolar, J. W. (2020). Artificial Neural Network (ANN) Based Fast and Accurate Inductor Modeling and Design. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 1, 284–299. doi : [10.1109/ojpe.2020.3012777](https://doi.org/10.1109/ojpe.2020.3012777).
- Guo, K., Qi, Y., Yu, J., Frey, D. & Tang, Y. (2021). A Converter-Based Power System Stabilizer for Stability Enhancement of Droop-Controlled Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6), 4616-4626. doi : [10.1109/TSG.2021.3096638](https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3096638).
- Gupta, Y., Doolla, S., Chatterjee, K. & Pal, B. C. (2021). Optimal DG Allocation and Volt–Var Dispatch for a Droop-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 169-181. doi : [10.1109/TSG.2020.3017952](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3017952).

- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M. & Guerrero, J. M. (2016). Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 200-215.
- Han, Y., Li, H., Shen, P., Coelho, E. A. A. & Guerrero, J. M. (2017). Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(3), 2427-2451.
- Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning : data mining, inference, and prediction*. Springer Science & Business Media.
- Heins, T., Joševski, M., Karthik Gurumurthy, S. & Monti, A. (2023). Centralized Model Predictive Control for Transient Frequency Control in Islanded Inverter-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(3), 2641-2652. doi : 10.1109/TPWRS.2022.3189958.
- Hoa Thi Pham, X. (2020). Power sharing strategy in islanded microgrids using improved droop control. *Electric Power Systems Research*, 180, 106164. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106164>.
- Hossain, R. R., Huang, Q. & Huang, R. (2021). Graph Convolutional Network-Based Topology Embedded Deep Reinforcement Learning for Voltage Stability Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4848-4851. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3084469.
- Hu, J., Shan, Y., Yang, Y., Parisio, A., Li, Y., Amjady, N., Islam, S., Cheng, K. W., Guerrero, J. M. & Rodríguez, J. (2024). Economic Model Predictive Control for Microgrid Optimization : A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(1), 472-484. doi : 10.1109/TSG.2023.3266253.
- Huang, S., Chen, Z., Wang, X., Li, S., Yu, X. & Li, Q. (2025). Performance-Guaranteed Finite-Time Secondary Control for Islanded AC Microgrids With Time-Varying Disturbances. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 16(2), 916-928. doi : 10.1109/TSG.2025.3526789.
- Huang, Y., Wang, Z., Liu, X. & Ye, X. (2023). A consensus based adaptive virtual capacitor control strategy for reactive power sharing and voltage restoration in microgrids. *Electric Power Systems Research*, 224, 109729. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109729>.
- Jabr, R. A. (2022). Economic Operation of Droop-Controlled AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(4), 3119-3128. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3130128.
- Jafar, R., Shahrour, I. & Juran, I. (2010). Application of artificial neural networks (ANN) to model the failure of urban water mains. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(9-10), 1170-1180.

- James, G., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning*. Springer.
- Jiang, W., Yang, C., Liu, Z., Liang, M., Li, P. & Zhou, G. (2019). A Hierarchical Control Structure for Distributed Energy Storage System in DC Micro-Grid. *IEEE Access*, 7, 128787–128795. doi : 10.1109/access.2019.2939626.
- Jirdehi, M. A., Tabar, V. S., Ghassemzadeh, S. & Tohidi, S. (2020). Different aspects of microgrid management : A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 30, 101457.
- Joisher, M., Singh, D., Taheri, S., Espinoza-Trejo, D. R., Pouresmaeil, E. & Taheri, H. (2020). A Hybrid Evolutionary-Based MPPT for Photovoltaic Systems Under Partial Shading Conditions. *IEEE Access*, 8, 38481–38492. doi : 10.1109/access.2020.2975742.
- Kaasstra, I. & Boyd, M. (1996). Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. *Neurocomputing*, 10(3), 215–236.
- Kahou, S. E. (2016). *Emotion Recognition with Deep Neural Networks*. (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/2290/>.
- Kalla, U. K., Singh, B., Murthy, S. S., Jain, C. & Kant, K. (2018). Adaptive Sliding Mode Control of Standalone Single-Phase Microgrid Using Hydro, Wind, and Solar PV Array-Based Generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6806–6814. doi : 10.1109/TSG.2017.2723845.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948 vol.4. doi : 10.1109/ICNN.1995.488968.
- Khadem, S. K., Basu, M. & Conlon, M. F. (2015). Intelligent Islanding and Seamless Reconnection Technique for Microgrid With UPQC. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(2), 483–492. doi : 10.1109/jestpe.2014.2326983.
- Khan, H. S. & Kauhaniemi, K. (2023). Design and FPGA-in-loop based validation of predictive hierarchical control for islanded AC microgrid. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 48, 101557. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101557>.
- Khan, M. Z., Ahmed, E. M., Habib, S. & Ali, Z. M. (2022). Multi-objective Optimization Technique for Droop Controlled Distributed Generators in AC Islanded Microgrid. *Electric Power Systems Research*, 213, 108671. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108671>.

- Khashman, A. (2010). Neural networks for credit risk evaluation : Investigation of different neural models and learning schemes. *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6233–6239.
- Khenar, M., Taheri, S., Cretu, A.-M., Hosseini, S. & Pouresmaeil, E. (2020). PSO-Based Modeling and Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Module Under Nonuniform Snow Patterns. *IEEE Access*, 8, 197484–197498. doi : 10.1109/access.2020.3034748.
- Khorramabadi, S. S. & Bakhshai, A. (2015). Intelligent Control of Grid-Connected Microgrids : An Adaptive Critic-Based Approach. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(2), 493–504. doi : 10.1109/jestpe.2014.2331188.
- Kim, S., Hyon, S. & Kim, C. (2018). Distributed virtual negative-sequence impedance control for accurate imbalance power sharing in islanded microgrids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 16, 28–36. doi : <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.04.001>.
- Kohn, W., Zabinsky, Z. B. & Nerode, A. (2015). A Micro-Grid Distributed Intelligent Control and Management System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2964–2974. doi : 10.1109/tsg.2015.2455512.
- Köksoy, O. (2006). Multiresponse robust design : mean square error (MSE) criterion. *Applied Mathematics and Computation*, 175(2), 1716–1729.
- Kong, W., Dong, Z. Y., Jia, Y., Hill, D. J., Xu, Y. & Zhang, Y. (2016). Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 841–851.
- Kong, W., Dong, Z. Y., Jia, Y., Hill, D. J., Xu, Y. & Zhang, Y. (2019). Short-Term Residential Load Forecasting Based on LSTM Recurrent Neural Network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 841–851. doi : 10.1109/TSG.2017.2753802.
- Kraiem, H., Flah, A., Mohamed, N., Alowaidi, M., Bajaj, M., Mishra, S., Sharma, N. K. & Sharma, S. K. (2021). Increasing Electric Vehicle Autonomy Using a Photovoltaic System Controlled by Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, 9, 72040–72054. doi : 10.1109/access.2021.3077531.
- Kulkarni, O. V., Doolla, S. & Fernandes, B. G. (2017). Mode Transition Control Strategy for Multiple Inverter-Based Distributed Generators Operating in Grid-Connected and Standalone Mode. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6), 5927–5939. doi : 10.1109/tia.2017.2743682.

- Kulkarni, S. V. & Gaonkar, D. N. (2021). Improved droop control strategy for parallel connected power electronic converter based distributed generation sources in an Islanded Microgrid. *Electric Power Systems Research*, 201, 107531. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107531>.
- Kwak, M., Choi, W., Heo, S., Lee, C., Nikam, R., Kim, S. & Hwang, H. (2021). Excellent Pattern Recognition Accuracy of Neural Networks Using Hybrid Synapses and Complementary Training. *IEEE Electron Device Letters*, 42(4), 609-612. doi : 10.1109/LED.2021.3058221.
- Lasabi, O., Swanson, A., Jarvis, L., Aluko, A. & Goudarzi, A. (2024). Coordinated Hybrid Approach Based on Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization for Distributed Secondary Control and Stability Analysis of Direct Current Microgrids. *Sustainability*, 16(3), 1204. doi : 10.3390/su16031204.
- Lasheen, A., Ammar, M. E., Zeineldin, H. H., Al-Durra, A., Shaaban, M. F. & El-Saadany, E. (2021). Assessing the Impact of Reactive Power Droop on Inverter Based Microgrid Stability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(3), 2380-2392. doi : 10.1109/TEC.2021.3052789.
- Leu, S.-S., Lo, H.-C. & Chen, C.-N. (2001). Neural-network-based regression model of ground surface settlement induced by deep excavation. *Automation in Construction*, 10(3), 371-380.
- Li, D., Zhang, Z., Liu, P., Wang, Z. & Zhang, L. (2021a). Battery Fault Diagnosis for Electric Vehicles Based on Voltage Abnormality by Combining the Long Short-Term Memory Neural Network and the Equivalent Circuit Model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 1303-1315. doi : 10.1109/TPEL.2020.3008194.
- Li, D., Liu, P., Zhang, Z., Zhang, L., Deng, J., Wang, Z., Dorrell, D. G., Li, W. & Sauer, D. U. (2022a). Battery Thermal Runaway Fault Prognosis in Electric Vehicles Based on Abnormal Heat Generation and Deep Learning Algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(7), 8513-8525. doi : 10.1109/TPEL.2022.3150026.
- Li, H., Ding, X., Xue, R., Li, G. & Chen, Y. (2021b). Active Damping Adaptive Controller for Grid-Connected Inverter Under Weak Grid. *IEEE Access*, 9, 132442-132454. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3115493.
- Li, J., Wen, B. & Wang, H. (2019). Adaptive Virtual Inertia Control Strategy of VSG for Micro-Grid Based on Improved Bang-Bang Control Strategy. *IEEE Access*, 7, 39509-39514. doi : 10.1109/ACCESS.2019.2904943.

- Li, L., Dong, M., Chen, X., Yi, F., Chen, G., Song, D. & Yang, J. (2022b). A hierarchical control scheme with bi-level communication networks for the interconnected DC microgrids cluster. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 142, 108342. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108342>.
- Li, Y., Deng, F., Qi, R. & Lin, H. (2022c). Adaptive virtual impedance regulation strategy for reactive and harmonic power sharing among paralleled virtual synchronous generators. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 140, 108059. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108059>.
- Li, Z., Cheng, Z., Si, J. & Li, S. (2022d). Distributed Event-Triggered Hierarchical Control to Improve Economic Operation of Hybrid AC/DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(5), 3653–3668. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3133487.
- Liew, C. K., Lim, W. P. & Mellon, S. J. (2016). Missing value imputation for the analysis of incomplete traffic accident data. *Information Sciences*, 339, 274–292.
- Lin, F.-J., Chen, C.-I., Xiao, G.-D. & Chen, P.-R. (2021a). Voltage Stabilization Control for Microgrid With Asymmetric Membership Function-Based Wavelet Petri Fuzzy Neural Network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(5), 3731–3741. doi : 10.1109/TSG.2021.3071357.
- Lin, S.-W., Chu, C.-C. & Tung, C.-F. (2023). Data-Driven Distributed Q-Learning Droop Control for Frequency Synchronization and Voltage Restoration in Isolated AC Micro-Grids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(6), 7306–7317. doi : 10.1109/TIA.2023.3300290.
- Lin, W., Wu, D. & Boulet, B. (2021b). Spatial-Temporal Residential Short-Term Load Forecasting via Graph Neural Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6), 5373–5384. doi : 10.1109/TSG.2021.3093515.
- Ling, Y., Li, Y., Yang, Z. & Xiang, J. (2021). A Dispatchable Droop Control Method for Distributed Generators in Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9), 8356–8366. doi : 10.1109/tie.2020.3013547.
- Liu, B., Wu, T., Liu, Z. & Liu, J. (2020a). A Small-AC-Signal Injection-Based Decentralized Secondary Frequency Control for Droop-Controlled Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 11634–11651. doi : 10.1109/tpel.2020.2983878.
- Liu, B., Song, Z., Yu, B., Yang, G. & Liu, J. (2024). A Feedforward Control-Based Power Decoupling Strategy for Grid-Forming Grid-Connected Inverters. *Energies*, 17(2), 424. doi : 10.3390/en17020424.

- Liu, C., Zhang, H., Shahidehpour, M., Zhou, Q. & Ding, T. (2022a). A Two-Layer Model for Microgrid Real-Time Scheduling Using Approximate Future Cost Function. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(2), 1264-1273. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3099336.
- Liu, J., Fang, W., Zhang, X. & Yang, C. (2015). An Improved Photovoltaic Power Forecasting Model With the Assistance of Aerosol Index Data. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(2), 434–442. doi : 10.1109/tste.2014.2381224.
- Liu, Y., Wang, Y., Liu, H., Xiong, L., Li, M., Peng, Y., Xu, Z. & Wang, M. (2022b). An LVRT strategy with quantitative design of virtual impedance for VSG. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 140, 107661. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107661>.
- Liu, Z., Wang, L. & Ma, L. (2020b). A Transactive Energy Framework for Coordinated Energy Management of Networked Microgrids With Distributionally Robust Optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 395-404. doi : 10.1109/TPWRS.2019.2933180.
- Llerena-Pizarro, O., Proenza-Perez, N., Tuna, C. E. & Silveira, J. L. (2020). A PSO-BPSO Technique for Hybrid Power Generation System Sizing. *IEEE Latin America Transactions*, 18(08), 1362–1370. doi : 10.1109/tla.2020.9111671.
- Long, B., Li, X., Rodriguez, J., Guerrero, J. M. & Chong, K. T. (2023). Frequency stability enhancement of an islanded microgrid : A fractional-order virtual synchronous generator. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 147, 108896.
- Lopez-Garcia, T. B., Coronado-Mendoza, A. & Domínguez-Navarro, J. A. (2020). Artificial neural networks in microgrids : A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 95, 103894.
- Lu, J., Liu, X., Savaghebi, M., Hou, X. & Wang, P. (2022). Distributed Event-Triggered Control for Harmonic Voltage Compensation in Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(6), 4190-4201. doi : 10.1109/TSG.2022.3186284.
- Lu, L.-Y. & Chu, C.-C. (2015). Consensus-Based Secondary Frequency and Voltage Droop Control of Virtual Synchronous Generators for Isolated AC Micro-Grids. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 5(3), 443-455. doi : 10.1109/JETCAS.2015.2462093.
- Lu, L.-Y. & Chu, C.-C. (2018). Consensus-Based Droop Control of Isolated Micro-Grids by ADMM Implementations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 5101-5112. doi : 10.1109/TSG.2017.2680445.

- Maas, A. L., Hannun, A. Y. & Ng, A. Y. (2013). Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. *International Conference on Machine Learning*, 30(1), 3.
- Madvar, H. R., Dehghani, M., Memarzadeh, R., Salwana, E., Mosavi, A. & S., S. (2020). Derivation of Optimized Equations for Estimation of Dispersion Coefficient in Natural Streams Using Hybridized ANN With PSO and CSO Algorithms. *IEEE Access*, 8, 156582–156599. doi : 10.1109/access.2020.3019362.
- Mardani, M. M., Lazar, R. D., Mijatovic, N. & Dragičević, T. (2023). Artificial Neural Network-Based Constrained Predictive Real-Time Parameter Adaptation Controller for Grid-Tied VSCs. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(2), 1507-1517. doi : 10.1109/JESTPE.2022.3214342.
- Martínez, A., Schmuck, C., Pereverzyev Jr, S., Pirker, C. & Haltmeier, M. (2017). A machine learning framework for customer purchase prediction in the non-contractual setting. *European Journal of Operational Research*, 281(3), 588–596.
- Martínez-Martínez, J. I., Escandón-Rivera, S., Morales-Matamoros, O., Tejeida-Padilla, R. & Lina-García, I. (2015). A systematic approach for fast and accurate short-term load forecasting. *Electric Power Systems Research*, 121, 104–114.
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. doi : 10.1007/BF02478259.
- Mehta, S. & Basak, P. (2021). A comprehensive review on control techniques for stability improvement in microgrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(4), e12822.
- Men, J., Liu, B., Wang, Y., Zhao, H. & Xu, K. (2016). A residual convolutional neural network based approach for predicting drug-target interactions. *Neurocomputing*, 218, 175–182.
- Meng, X., Liu, J. & Liu, Z. (2019). A Generalized Droop Control for Grid-Supporting Inverter Based on Comparison Between Traditional Droop Control and Virtual Synchronous Generator Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(6), 5416–5438. doi : 10.1109/tpel.2018.2868722.
- Mestriner, D., Labella, A., Brignone, M., Bonfiglio, A. & Procopio, R. (2020). A transient stability approach for the analysis of droop-controlled islanded microgrids. *Electric Power Systems Research*, 187, 106509. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106509>.

- Mi, Y., Song, Y., Fu, Y. & Wang, C. (2020). The Adaptive Sliding Mode Reactive Power Control Strategy for Wind–Diesel Power System Based on Sliding Mode Observer. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(4), 2241-2251. doi : 10.1109/TSTE.2019.2952142.
- Micallef, A., Apap, M., Spiteri-Staines, C. & Guerrero, J. M. (2015). Single-Phase Microgrid With Seamless Transition Capabilities Between Modes of Operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2736-2745. doi : 10.1109/TSG.2015.2444912.
- Michael, J., Henke, C. & Trächtler, A. (2019). Decentralized Energy Management for Smart Home System of Systems. *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, pp. 1-8. doi : 10.1109/SYSCON.2019.8836960.
- Milczarek, A., Malinowski, M. & Guerrero, J. M. (2015). Reactive Power Management in Islanded Microgrid—Proportional Power Sharing in Hierarchical Droop Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1631-1638. doi : 10.1109/TSG.2015.2396639.
- Moghaddam, A. A., Seifi, A., Niknam, T. & Alizadeh Pahlavani, M. R. (2011). Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source. *Energy*, 36(11), 6490-6507. doi : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.017>.
- Moghaddam, D. D., Moayeri, M. H. & Mirzaei, F. (2016). Developing comparative mathematic models for predicting soil infiltration rate. *Water and Environment Journal*, 30(1-2), 1–9.
- Mohiuddin, S. M. & Qi, J. (2022). Optimal Distributed Control of AC Microgrids With Coordinated Voltage Regulation and Reactive Power Sharing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(3), 1789-1800. doi : 10.1109/TSG.2022.3147446.
- Naderi, M., Khayat, Y., Batmani, Y. & Bevrani, H. (2016). Robust Multivariable Microgrid Control Synthesis and Analysis. *Energy Procedia*, 100, 375–387. doi : 10.1016/j.egypro.2016.10.191.
- Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q., Dragicevic, T., Bevrani, H. & Blaabjerg, F. (2020). Interconnected Autonomous AC Microgrids via Back-to-Back Converters—Part I : Small-Signal Modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4728-4740. doi : 10.1109/TPEL.2019.2943996.
- Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Ramachandaramurthy, V. K., Kalam, A. & Miveh, M. R. (2019). Hierarchical control strategy for a three-phase 4-wire microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions. *ISA Transactions*, 94, 352-369. doi : <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.025>.

- Nandakumar, A., Li, Y., Xu, Z. & Huang, D. (2025). Enhancing Transient Dynamics Stabilization in Islanded Microgrids Through Adaptive and Hierarchical Data-Driven Predictive Droop Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 16(1), 396-410. doi : 10.1109/TSG.2024.3448460.
- Nasirian, V., Shafiee, Q., Guerrero, J. M., Lewis, F. L. & Davoudi, A. (2016). Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1600-1617. doi : 10.1109/TPEL.2015.2414457.
- Nawaz, A., Zhou, M., Wu, J. & Long, C. (2022). A comprehensive review on energy management, demand response, and coordination schemes utilization in multi-microgrids network. *Applied Energy*, 323, 119596.
- Nawi, N. M., Atomi, W. H. & Rehman, M. Z. (2013). The effect of data pre-processing on optimized training of artificial neural networks. *Procedia Technology*, 11, 32–39.
- Nespoli, A., Leva, S., Mussetta, M. & Ogliari, E. G. C. (2022). A Selective Ensemble Approach for Accuracy Improvement and Computational Load Reduction in ANN-Based PV Power Forecasting. *IEEE Access*, 10, 32900-32911. doi : 10.1109/ACCESS.2022.3158364.
- Niu, X., Zhang, C., Qu, Y., Wang, X. & Li, H. (2024). A New Composite Control Strategy for Large-Signal Stabilization of Constant Power Loads in Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(5), 4407-4423. doi : 10.1109/TSG.2024.3396470.
- Örkücü, H. H. & Bal, H. (2011). Competitive neural network approach to forecast the demand for tourism in Turkey. *Economic Modelling*, 28(4), 1431–1436.
- Palani, S., Liong, S.-Y. & Tkalich, P. (2008). An ANN application for water quality forecasting. *Marine Pollution Bulletin*, 56(9), 1586–1597.
- Patanaik, K. N., Barik, S. K., Paikray, S. K. & Misra, U. (2018). A closed-loop supply chain model with fuzzy demand and fuzzy collection rate under possibility and necessity constraints. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(5), 2877–2893.
- Patarroyo-Montenegro, J. F., Andrade, F., Guerrero, J. M. & Vasquez, J. C. (2021). A Linear Quadratic Regulator With Optimal Reference Tracking for Three-Phase Inverter-Based Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(6), 7112-7122. doi : 10.1109/TPEL.2020.3036594.
- Poonahela, I., Krama, A., Bayhan, S., Fesli, U., Shadmand, M. B., Abu-Rub, H. & Begovic, M. M. (2023). Hierarchical Model-Predictive Droop Control for Voltage and Frequency Restoration in AC Microgrids. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 4, 85-97. doi : 10.1109/OJIES.2023.3240070.

- Priyadarshi, N., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., Blaabjerg, F. & Bhaskar, M. S. (2020). An Experimental Estimation of Hybrid ANFIS PSO-Based MPPT for PV Grid Integration Under Fluctuating Sun Irradiance. *IEEE Systems Journal*, 14(1), 1218–1229. doi : 10.1109/jsyst.2019.2949083.
- Punitha, K. & Punithavalli, M. (2013). TSK-type neurofuzzy system with a novel learning method. *Applied Soft Computing*, 13(4), 1676–1688.
- Pérez-Ibacache, R., Castro, R. S., Pimentel, G. A. & Bizzo, B. S. (2022). Dynamic Output-Feedback Decentralized Control Synthesis for Integration of Distributed Energy Resources in AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(2), 1225-1237. doi : 10.1109/TSG.2021.3124859.
- Qian, T., Liu, Y., Zhang, W., Tang, W. & Shahidehpour, M. (2020). Event-Triggered Updating Method in Centralized and Distributed Secondary Controls for Islanded Microgrid Restoration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2), 1387-1395. doi : 10.1109/TSG.2019.2937366.
- Raeispour, M., Atrianfar, H., Baghaee, H. R. & Gharehpetian, G. B. (2021). Robust Sliding Mode and Mixed H_2/H_∞ Output Feedback Primary Control of AC Microgrids. *IEEE Systems Journal*, 15(2), 2420-2431. doi : 10.1109/JSYST.2020.2999553.
- Rashidirad, N., Mahseredjian, J., Kocar, I., Karaagac, U. & Saad, O. (2023). MANA-Based Load-Flow Solution for Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(2), 889-898. doi : 10.1109/TSG.2022.3199762.
- Rathore, B., Chakrabarti, S. & Srivastava, L. (2021). A Self-Regulated Virtual Impedance control of VSG in a microgrid. *Electric Power Systems Research*, 197, 107289. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107289>.
- Refaat, S. S., Ellabban, O., Bayhan, S., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F. & Begovic, M. M. (2021). Microgrids. Dans *Smart Grid and Enabling Technologies* (pp. 141-167). doi : 10.1002/9781119422464.ch5.
- Rodrigues, F., Molina, Y. & Araujo, C. (2020). Simultaneous Tuning of AVR and PSS Using Particle Swarm Optimization with Two Stages. *IEEE Latin America Transactions*, 18(09), 1623-1630. doi : 10.1109/TLA.2020.9381805.
- Rohten, J. A., Silva, J. J., Muñoz, J. A., Villarroel, F. A., Dewar, D. N., Rivera, M. E. & Espinoza, J. R. (2020). A Simple Self-Tuning Resonant Control Approach for Power Converters Connected to Micro-Grids With Distorted Voltage Conditions. *IEEE Access*, 8, 216018-216028. doi : 10.1109/ACCESS.2020.3041528.

- Roncero-Clemente, C., Gonzalez-Romera, E., Barrero-González, F., Milanés-Montero, M. I. & Romero-Cadaval, E. (2021). Power-Flow-Based Secondary Control for Autonomous Droop-Controlled AC Nanogrids With Peer-to-Peer Energy Trading. *IEEE Access*, 9, 22339-22350. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3056451.
- Roos, M. H., Nguyen, P. H., Morren, J. & Slootweg, J. G. (2021). Stability Analysis of Microgrid Islanding Transients Based on Interconnected Dissipative Subsystems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6), 4655-4667. doi : 10.1109/TSG.2021.3100396.
- Rosenbaum, E. B. & Johnson, J. L. (1984). A proposed modification to the Neurode model for improved performance of the backpropagation algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), 926–931.
- Rosini, A., Labella, A., Bonfiglio, A., Procopio, R. & Guerrero, J. M. (2021). A review of reactive power sharing control techniques for islanded microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110745.
- Routray, A., Singh, R. K. & Mahanty, R. (2020). Harmonic Reduction in Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Using Modified Grey Wolf Optimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1827-1838. doi : 10.1109/TIA.2019.2957252.
- Roy, N. B. & Das, D. (2021). Optimal allocation of active and reactive power of dispatchable distributed generators in a droop controlled islanded microgrid considering renewable generation and load demand uncertainties. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 27, 100482. doi : <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100482>.
- Rusk, N. (2015). Deep learning. *Nature Methods*, 13(1), 35–35.
- Sadabadi, M. S., Sahoo, S. & Blaabjerg, F. (2021). A Fully Resilient Cyber-Secure Synchronization Strategy for AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(12), 13372-13378. doi : 10.1109/TPEL.2021.3091587.
- Saeed, M. H., Fangzong, W., Kalwar, B. A. & Iqbal, S. (2021). A Review on Microgrids' Challenges and Perspectives. *IEEE Access*, 9, 166502-166517. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3135083.
- Saigal, S. & Mehrotra, D. (2012). Performance comparison of the five conventional neural network learning algorithms for the non-linear chemical data. *WSEAS Transactions on Computers*, 11(9), 296–305.

- Samavati, E. & Mohammadi, H. (2019). Simultaneous voltage and current harmonics compensation in islanded/grid-connected microgrids using virtual impedance concept. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 20, 100258. doi : <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100258>.
- Sarkar, S. & Pandey, A. D. (2015). Application of optimized machine learning techniques for prediction of occupational accidents. *Computers & Operations Research*, 106, 210–224.
- Schmidt, R. M. (2019). Recurrent Neural Networks (RNNs) : A gentle Introduction and Overview. Repéré à <https://arxiv.org/abs/1912.05911>.
- Sellamna, H., Pavan, A. M., Mellit, A. & Guerrero, J. M. (2020). An iterative adaptive virtual impedance loop for reactive power sharing in islanded meshed microgrids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 24, 100395. doi : <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100395>.
- Semero, Y. K., Zhang, J. & Zheng, D. (2018). PV power forecasting using an integrated GA-PSO-ANFIS approach and Gaussian process regression based feature selection strategy. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 4(2), 210-218. doi : 10.17775/CSEEJPES.2016.01920.
- Sepehrzad, R., Khojasteh Rahimi, M., Al-Durra, A., Allahbakhshi, M. & Moridi, A. (2022). Optimal energy management of distributed generation in micro-grid to control the voltage and frequency based on PSO-adaptive virtual impedance method. *Electric Power Systems Research*, 208, 107881. doi : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107881>.
- Shadabi, H. & Kamwa, I. (2021). Dual Adaptive Nonlinear Droop Control of VSC-MTDC System for Improved Transient Stability and Provision of Primary Frequency Support. *IEEE Access*, 9, 76806–76815. doi : 10.1109/access.2021.3078066.
- Shahab, M. A., Mozafari, B., Soleymani, S., Dehkordi, N. M., Shourkaei, H. M. & Guerrero, J. M. (2020). Distributed Consensus-Based Fault Tolerant Control of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1), 37-47. doi : 10.1109/TSG.2019.2916727.
- Shariatzadeh, F., Vellaithurai, C., Biswas, S., Zamora, R. & Srivastava, A. (2014, apr). Real time implementation of intelligent reconfiguration algorithm for microgrid. *2014 IEEE PES TmpD Conference and Exposition*. doi : 10.1109/tdc.2014.6863321.
- Sharma, R. & Suhag, S. (2019). Virtual impedance based phase locked loop for control of parallel inverters connected to islanded microgrid. *Computers and Electrical Engineering*, 73, 58-70. doi : <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.11.005>.

- Sharma, R. K., Mishra, S. & Pullaguram, D. (2020). A Robust H_{∞} Multivariable Stabilizer Design for Droop Based Autonomous AC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(6), 4369-4382. doi : 10.1109/TPWRS.2020.3000312.
- Sharma, S. & Venugopalan, K. (2014). Activation functions in neural networks. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(12), 310–316.
- Shi, M., Chen, X., Shahidehpour, M., Zhou, Q. & Wen, J. (2021). Observer-Based Resilient Integrated Distributed Control Against Cyberattacks on Sensors and Actuators in Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(3), 1953-1963. doi : 10.1109/TSG.2021.3050203.
- Simpson-Porco, J. W., Shafiee, Q., Dorfler, F., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. & Bullo, F. (2015). Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 7025–7038. doi : 10.1109/tie.2015.2436879.
- Singh, D. & Singh, B. (2015). Comparative analysis of proficiency of different kernels used in support vector machines. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 7(3), 33–40.
- Siu, K. K. M. & Ho, C. N. M. (2020). Generalized design approach of a family of grid-connected converters based on active virtual ground technique for single-phase AC microgrid applications. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 5(3), 203-212. doi : 10.24295/CPSSTPEA.2020.00017.
- Sola, J. & Sevilla, J. (1997). Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(3), 1464–1468.
- Song, Q., Chen, X., Liu, J., Chen, J. & Loo, K.-H. (2024). Decentralized Energy Management of Renewable Hydrogen Production Systems Without Communication Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(8), 8927-8937. doi : 10.1109/TIE.2023.3327528.
- Specht, D. F. (1991). A general regression neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2(6), 568–576.
- Tetko, I. V., Livingstone, D. J. & Luik, A. I. (1995). Neural network studies. 1. Comparison of overfitting and overtraining. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 35(5), 826–833.

- Tian, Y. (2012). Artificial neural network model for the prediction of groundwater level in a coastal aquifer. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1524–1531.
- Trejo-Perea, M., Herrera-Ruiz, G., Ríos-Moreno, G. & Trejo-Macotela, F. (2009). Analysis of neural networks training and validation for modeling the mixing processes in drinking water systems. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6450–6457.
- Triki, Y., Bechouche, A., Seddiki, H. & Abdeslam, D. O. (2020, feb). Improved D-Q Frame Controller for Stand-Alone Single-Phase Inverters. *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. doi : 10.1109/icit45562.2020.9067152.
- Trinh, Q. N., Wang, P., Tang, Y. & Choo, F. H. (2018). Mitigation of DC and Harmonic Currents Generated by Voltage Measurement Errors and Grid Voltage Distortions in Transformerless Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(2), 801-813. doi : 10.1109/TEC.2017.2763240.
- Tripepi, G., Jager, K. J., Dekker, F. W. & Zoccali, C. (2008). Linear and logistic regression analysis. *Kidney International*, 73(7), 806–810.
- Turan, M. K., Aydin, E., Dugenci, M. & Demirci, M. T. (2011). Prediction of the ultimate buckling load of variable-angle-tow laminated composite panels using artificial neural networks. *Composite Structures*, 93(12), 3177–3181.
- Vaishnav, V., Jain, A. & Sharma, D. (2025). Auxiliary Network-Enabled Attack Detection and Resilient Control of Islanded AC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 16(2), 1641-1653. doi : 10.1109/TSG.2024.3459967.
- Valencia, F., Collado, J., Saez, D. & Marin, L. G. (2016). Robust Energy Management System for a Microgrid Based on a Fuzzy Prediction Interval Model. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1486–1494. doi : 10.1109/tsg.2015.2463079.
- Vanashi, H. K., Mohammadi, F. D., Verma, V., Solanki, J. & Solanki, S. K. (2022). Hierarchical multi-agent based frequency and voltage control for a microgrid power system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 135, 107535. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107535>.
- Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., Meersman, B., Guerrero, J. M. & Vandevelde, L. (2012). Automatic Power-Sharing Modification of P/V Droop Controllers in Low-Voltage Resistive Microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2318-2325. doi : 10.1109/TPWRD.2012.2212919.

- Venayagamoorthy, G. K., Sharma, R. K., Gautam, P. K. & Ahmadi, A. (2016). Dynamic Energy Management System for a Smart Microgrid. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 27(8), 1643–1656. doi : 10.1109/tnnls.2016.2514358.
- Vilaisarn, Y., Moradzadeh, M., Abdelaziz, M. & Cros, J. (2022). An MILP formulation for the optimum operation of AC microgrids with hierarchical control. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137, 107674. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107674>.
- Wan, Y., Wen, G., Yu, X. & Kurths, J. (2024). Distributed Event-Based Resilient Secondary Control for AC Microgrids : A Trust-Reputation Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(2), 2116–2128. doi : 10.1109/TSG.2023.3302902.
- Wang, C., Jiao, S., Zhang, Y., Wang, X. & Li, Y. (2024). Adaptive Variable Universe Fuzzy Droop Control Based on a Novel Multi-Strategy Harris Hawk Optimization Algorithm for a Direct Current Microgrid with Hybrid Energy Storage. *Energies*, 17(21), 5296. doi : 10.3390/en17215296.
- Wang, C., Mi, Y., Fu, Y. & Wang, P. (2018). Frequency Control of an Isolated Micro-Grid Using Double Sliding Mode Controllers and Disturbance Observer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 923–930. doi : 10.1109/TSG.2016.2571439.
- Wang, S. & Tang, H. (2006). Data preprocessing for data mining. *Applied Intelligence*, 17(3), 375–381.
- Wang, W.-c., Chau, K.-w., Cheng, C.-t. & Qiu, L. (2009). A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of Hydrology*, 374(3–4), 294–306.
- Wang, Y. & Wai, R.-J. (2022). Adaptive Fuzzy-Neural-Network Power Decoupling Strategy for Virtual Synchronous Generator in Micro-Grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(4), 3878–3891. doi : 10.1109/TPEL.2021.3120519.
- Wang, Y., Deng, C., Liu, D., Xu, Y. & Dai, J. (2021). Unified Real Power Sharing of Generator and Storage in Islanded Microgrid via Distributed Dynamic Event-Triggered Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(3), 1713–1724. doi : 10.1109/TPWRS.2020.3039530.
- Watson, J. D., Ojo, Y., Laib, K. & Lestas, I. (2021). A Scalable Control Design for Grid-Forming Inverters in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6), 4726–4739. doi : 10.1109/TSG.2021.3105730.

- Wei, C., Zhang, Z., Qiao, W. & Qu, L. (2016). An Adaptive Network-Based Reinforcement Learning Method for MPPT Control of PMSG Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(11), 7837–7848. doi : 10.1109/tpel.2016.2514370.
- Willmott, C. J. & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.
- Xu, J., Qian, H., Hu, Y., Bian, S. & Xie, S. (2021). Overview of SOGI-Based Single-Phase Phase-Locked Loops for Grid Synchronization Under Complex Grid Conditions. *IEEE Access*, 9, 39275–39291. doi : 10.1109/access.2021.3063774.
- Xue, H., Bai, Y., Hu, H., Xu, T. & Liang, H. (2019). A Novel Hybrid Model Based on TVIW-PSO-GSA Algorithm and Support Vector Machine for Classification Problems. *IEEE Access*, 7, 27789–27801. doi : 10.1109/access.2019.2897644.
- Yang, C.-C., Chang, L.-C., Chen, C.-S. & Yeh, M.-S. (2009). An improved neural network approach to the determination of aquifer parameters. *Journal of Hydrology*, 316(1-4), 281–289.
- Yang, Y. & Wai, R.-J. (2021). Design of Adaptive Fuzzy-Neural-Network-Imitating Sliding-Mode Control for Parallel-Inverter System in Islanded Micro-Grid. *IEEE Access*, 9, 56376-56396. doi : 10.1109/ACCESS.2021.3071832.
- Yang, Z., Song, P., Song, J., Wang, X. & Li, X. (2020). An MMC Circulating Current Suppressing Controller Based on Bridge Arm Common-Mode Voltage. *IEEE Access*, 8, 189471-189478. doi : 10.1109/ACCESS.2020.3031307.
- Yarikkaya, S. & Vardar, K. (2023). Neural Network Based Predictive Current Controllers for Three Phase Inverter. *IEEE Access*, 11, 27155-27167. doi : 10.1109/ACCESS.2023.3258679.
- Yuan, W., Wang, Y. & Chen, Z. (2021). New Perspectives on Power Control of AC Microgrid Considering Operation Cost and Efficiency. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4844-4847. doi : 10.1109/TPWRS.2021.3080141.
- Zanetti, R., Duarte, J. L. & Roes, M. (2007). Application of neural networks to hybrid wind-photovoltaic power system. *Renewable Energy*, 32(7), 1225–1234.
- Zhang, C., Zhao, J., Dou, X., Hu, Q., Leng, J. & Liu, K. (2024a). Containment-Based Distributed Cooperative Control of Microgrid Clusters : Accurately Constraining the Bus States of Loads and Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(4), 5741-5754. doi : 10.1109/TPWRS.2023.3337105.

- Zhang, G., Eddy Patuwo, B. & Y Hu, M. (2003). Artificial neural networks for load forecasting in a restructured power system. *Electric Power Systems Research*, 65(2), 109–119.
- Zhang, L. & Morris, J. (1998). Multivariate adaptive regression splines and neural network models for prediction of pile drivability. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 1049–1059.
- Zhang, Q. & Stanley, S. (1999). Artificial neural networks in water quality forecasting. *Journal of Environmental Engineering*, 125(9), 803–813.
- Zhang, Q.-Q. & Wai, R.-J. (2022). Design of Adaptive Distributed Secondary Control Using Double-Hidden-Layer Recurrent-Neural-Network-Inherited Total-Sliding-Mode Scheme for Islanded Micro-Grid. *IEEE Access*, 10, 5990-6009. doi : 10.1109/ACCESS.2022.3140360.
- Zhang, W., Wang, Y., Han, F. & Yang, R. (2024b). Composite Sliding Mode Control of Phase Circulating Current for the Parallel Three-Phase Inverter Systems. *Energies*, 17(6), 1389. doi : 10.3390/en17061389.
- Zhong, Q.-C. (2020). *Power Electronics-Enabled Autonomous Power Systems*. Wiley. doi : 10.1002/9781118803516.
- Zhou, J., Sun, H., Xu, Y., Han, R., Yi, Z., Wang, L. & Guerrero, J. M. (2021). Distributed Power Sharing Control for Islanded Single-/Three-Phase Microgrids With Admissible Voltage and Energy Storage Constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 2760-2775. doi : 10.1109/TSG.2021.3057899.
- Zhou, Q., Shahidehpour, M., Li, Z., Che, L., Alabdulwahab, A. & Abusorrah, A. (2020). Compartmentalization Strategy for the Optimal Economic Operation of a Hybrid AC/DC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(2), 1294-1304. doi : 10.1109/TPWRS.2019.2942273.
- Zhu, G.-r., Wang, H., Liang, B., Tan, S.-C. & Jiang, J. (2016). Enhanced Single-Phase Full-Bridge Inverter With Minimal Low-Frequency Current Ripple. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2), 937-943. doi : 10.1109/TIE.2015.2491881.
- Zouari, M., Baklouti, N., Sanchez-Medina, J., Kammoun, H. M., Ayed, M. B. & Alimi, A. M. (2022). PSO-Based Adaptive Hierarchical Interval Type-2 Fuzzy Knowledge Representation System (PSO-AHIT2FKRS) for Travel Route Guidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 804–818. doi : 10.1109/tits.2020.3016054.

Çelik, D. & Meral, M. E. (2022). A coordinated virtual impedance control scheme for three phase four leg inverters of electric vehicle to grid (V2G). *Energy*, 246, 123354. doi : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123354>.