

# Optimisation du comportement d'onduleurs monophasés résidentiels sur le réseau de distribution

par

Billy Labelle

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 16 JANVIER 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Billy Labelle, 2024



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**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Handy Fortin-Blanchette, directeur de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Duchaine, président du jury  
Département de génie des systèmes à l'École de Technologie Supérieure

M. Kamal Al-Haddad, membre du jury  
Département de génie électrique à l'École de Technologie Supérieure

M. Tarek Ould-Bachir, examinateur externe  
Département de génie informatique et génie logiciel à Polytechnique Montréal

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

LE 21 DÉCEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier M. Handy Fortin-Blanchette pour son temps, son aide inconditionnelle et les chaleureuses discussions tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses précieux conseils et son mentorat ont rendu possible la réalisation de cet ouvrage.

Je tiens également à remercier tout mon entourage pour leur support lors des dernières années. Ce travail n'aurait pas été possible sans vous.



# **Optimisation du comportement d'onduleurs monophasés résidentiels sur le réseau de distribution**

Billy Labelle

## **RÉSUMÉ**

Depuis les dernières années, les sources d'énergie renouvelable sont en grand essor dans l'objectif de décarboner le domaine de l'énergie. Les systèmes de production photovoltaïque, faisant partie de ce regroupement d'énergie verte, sont aussi de plus en plus en vogue, et ce pour tout niveau de puissance. Par leur nature intermittente et à base de semi-conducteurs, elles modifient le comportement du réseau lorsqu'elles sont intégrées en grand nombre. Cette modification peut être nocive dans certaines situations de réseau si le comportement des nouvelles technologies est compromis par ces situations. Les événements cités dans WECC (2018) ne sont que quelques exemples. Heureusement, certaines stratégies de contrôle peuvent être utilisées afin d'atténuer ces impacts négatifs et dans certains cas pourraient aussi améliorer le comportement du réseau. Cet ouvrage explorera cette problématique et mettra en lumière ces stratégies afin d'harmoniser le plus possible le réseau traditionnel avec ces nouvelles sources d'énergie.

**Mots-clés:** solaire, photovoltaïque, réseau, distribution, stratégies, contrôle





# **Optimisation of the dynamic performance of residential monophasic inverters connected to the distribution grid**

Billy Labelle

## **ABSTRACT**

In the last few years, renewable energy sources have known a big increase in their popularity in order to meet clean energy requirements and policies. Solar production facilities, at a small and large scale, are a major component in order to meet these requirements. However, due to their intermittent nature and their conception which is with power electronics, they modify the dynamics of the power system when integrated in large numbers. This modification of the dynamics may be harmful in some cases as cited in WECC (2018). Fortunately, there are some control strategies that can be implemented in order to mitigate some of these issues and even sometimes help the grid. This Master's thesis will cover this problematic and will try to shed light on these strategies with the goal to help harmonize the traditional grid with synchronous machines with these new sources of energy.

**Keywords:** solar, photovoltaic, grid, distribution, strategy, control



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 MODÉLISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ .....	3
1.1 Présentation du système global .....	3
1.2 Boucle à verrouillage de phase .....	4
1.3 Commande de l'onduleur .....	11
1.4 Pont en H à IGBT .....	18
1.5 Filtre LCL et réseau équivalent .....	18
1.6 Conclusion du chapitre 1 .....	19
CHAPITRE 2 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ .....	21
2.1 Rampe de courant .....	21
2.2 Échelon de tension .....	23
2.3 Échelon de fréquence .....	24
2.4 Réjection des harmoniques .....	25
2.5 Conclusion du chapitre 2 .....	28
CHAPITRE 3 OPTIMISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ .....	29
3.1 Validation du modèle avec une valeur de $r_c$ diminuée .....	30
3.2 Ajout du mode de régulation tension-puissance réactive .....	31
3.3 Performance de l'onduleur en présence d'impédances variables .....	33
3.4 Conclusion du chapitre 3 .....	38
CHAPITRE 4 BRANCHEMENT DE PLUSIEURS ONDULEURS AU MÊME POINT DE RACCORDEMENT .....	41
4.1 Modélisation de plusieurs onduleurs au même point de raccordement .....	41
4.2 Validation du branchement de plusieurs onduleurs au même point de raccordement .....	44
4.3 Conclusion du chapitre 4 .....	67
CHAPITRE 5 ESTIMATION DE LA VALEUR D'IMPÉDANCE DU RÉSEAU PERÇUE PAR L'ONDULEUR .....	69
5.1 Survol de la structure du perceptron multicouche .....	69
5.2 Prétraitement des données et structure de la couche d'entrée .....	71
5.3 Couches cachées et fonction d'activation .....	72
5.4 Fonction de coût et propagation arrière .....	73
5.5 Prédiction de l'impédance réseau avec le MLP .....	74
5.6 Conclusion du chapitre 5 .....	81
CHAPITRE 6 CONCLUSION .....	83

CHAPITRE 7	RECOMMANDATIONS .....	85
ANNEXE I	COURBES D'ESSAIS DE L'ONDULEUR OPTIMISÉ .....	87
ANNEXE II	CODE MATLAB DU CONTRÔLE VOLT/VAR .....	91
ANNEXE III	SOMMAIRE DES PRÉDICTIONS DE L'ONDULEUR 120V LORS D'INJECTION DE PUISSANCE ACTIVE .....	95
ANNEXE IV	DONNÉES DES SIMULATIONS DE L'ONDULEUR 120V INJECTANT DE LA PUISSANCE ACTIVE POUR ENTRAÎNER LE MLP .....	99
ANNEXE V	CODE PYTHON AFIN DE RÉALISER LE MLP .....	105
ANNEXE VI	DONNÉES UTILISÉES POUR ENTRAÎNER LE MLP SERVANT À PRÉDIRE L'IMPÉDANCE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ....	113
ANNEXE VII	RÉSULTATS DES PRÉDICTIONS DE L'ONDULEUR 120V LORS D'UN FONCTIONNEMENT EN STATCOM .....	121
BIBLIOGRAPHIE .....		124

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Paramètres de commande pour le dimensionnement avec compensation harmonique .....	17
Tableau 2.1	Amplitude des harmoniques injectées pour l'essai de réjection d'harmoniques .....	26
Tableau 3.1	Gain de la PLL, $r_c = 0,5\Omega$ .....	31
Tableau 4.1	Impédances équivalentes .....	42
Tableau 5.1	Paramètres de l'algorithme MLP .....	75
Tableau 5.2	Résultats de la prédiction sur l'onduleur 120V avec représentation complète des différentes impédances .....	77
Tableau 5.3	Résultats expérimentaux pour un onduleur générique .....	77
Tableau 5.4	Paramètres de l'algorithme MLP .....	80



## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Modèle complet de l'onduleur monophasé .....	4
Figure 1.2	Boucle à verrouillage de phase .....	5
Figure 1.3	Diagramme de Bode du filtre Notch adaptatif centré à 2 fois la fréquence du réseau .....	9
Figure 1.4	Schéma bloc du modèle représentant le filtre Notch adaptatif .....	11
Figure 1.5	Schéma bloc du modèle représentant le contrôle haut niveau de l'onduleur ainsi que l'équivalent réseau .....	12
Figure 1.6	Schéma bloc du modèle représentant la génération des signaux de commande envoyés aux 4 IGBT .....	13
Figure 1.7	Schéma bloc du modèle en commutation représentant le pont d'IGBT de l'onduleur .....	13
Figure 1.8	Schéma bloc du modèle représentant le filtre LCL de l'onduleur .....	14
Figure 1.9	Diagramme de Bode de la fonction de transfert de l'onduleur raccordé au réseau Tirée de Bruyant-Rozoy (2019) .....	16
Figure 2.1	Rampe positive de courant de 15A à 25A .....	22
Figure 2.2	Rampe négative de courant de 15A à 5A .....	22
Figure 2.3	Échelon de tension de 180V à 90V .....	23
Figure 2.4	Échelon de fréquence de 60Hz à 60.5Hz .....	24
Figure 2.5	Échelon de fréquence de 60Hz à 60.5Hz - Comparaison de la phase de la PLL avec la tension du réseau .....	25
Figure 2.6	Onduleur relié à un réseau pollué - Courant injecté et tension du réseau ainsi que leur THD .....	26
Figure 2.7	Onduleur relié à un réseau pollué - Vue rapprochée sur le courant injecté et la tension du réseau .....	27
Figure 2.8	Onduleur relié à un réseau pollué - THD du sinus reconstitué avec la phase estimée de la PLL .....	27

Figure 3.1	Filtre LCL de l'onduleur monophasé .....	29
Figure 3.2	Caractéristique tension-puissance réactive des onduleurs en mode tension-puissance réactive Tirée de IEE (2018) .....	32
Figure 3.3	Établissement des valeurs de tension et puissance réactive - mode de contrôle tension-puissance réactive Tirée de IEE (2018) .....	33
Figure 3.4	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,3 \Omega$ .....	35
Figure 3.5	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,3 \Omega$ - Vue rapprochée .....	35
Figure 3.6	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,4 \Omega$ .....	36
Figure 3.7	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,4 \Omega$ - Vue rapprochée .....	36
Figure 3.8	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,5 \Omega$ .....	37
Figure 3.9	Combinaisons de $L_g$ et $r_g$ pour une valeur de $r_c$ de $0,5 \Omega$ - Vue rapprochée .....	37
Figure 4.1	Schéma bloc de deux onduleurs raccordés au même transformateur de distribution .....	42
Figure 4.2	Paramètres du transformateur de distribution .....	43
Figure 4.3	Courant injecté des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané .....	46
Figure 4.4	THD du courant injecté des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané .....	46
Figure 4.5	Consignes de la machine à état pour le courant $I_p$ et $I_q$ des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané .....	47
Figure 4.6	Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané .....	47
Figure 4.7	Courant injecté des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé .....	48
Figure 4.8	THD du courant injecté des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé .....	48



Figure 4.9	Consignes de la machine à état pour le courant $I_p$ et $I_q$ des 2 onduleurs dans un réseau fort, contrôle décalé .....	49
Figure 4.10	Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé .....	49
Figure 4.11	Courant injecté dans le réseau des 2 onduleurs en présence d'un réseau faible pour un contrôle simultané .....	51
Figure 4.12	THD du courant injecté dans le réseau pour les 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané .....	51
Figure 4.13	Consignes de la machine à état pour le courant $I_p$ et $I_q$ des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané .....	52
Figure 4.14	Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané .....	52
Figure 4.15	Courant injecté dans le réseau des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé .....	53
Figure 4.16	THD du courant injecté dans le réseau pour les 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé .....	53
Figure 4.17	Consignes de la machine à état pour le courant $I_p$ et $I_q$ des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé .....	54
Figure 4.18	Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé .....	54
Figure 4.19	Paramètres du transformateur de distribution, modèle moyen .....	57
Figure 4.20	Modèle Simulink de deux onduleurs avec leurs modèles moyens .....	58
Figure 4.21	Schéma bloc de la commande de l'onduleur générant la référence pour la MLI de l'onduleur .....	58
Figure 4.22	Schéma bloc de la génération des signaux de commutations des IGBT ..	58
Figure 4.23	Schéma bloc des IGBT de l'onduleur pour le modèle en commutation ..	59
Figure 4.24	Schéma bloc du filtre LCL .....	59
Figure 4.25	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle simultané, réseau fort .....	60

Figure 4.26	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé, réseau fort .....	61
Figure 4.27	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé avec STATCOM, réseau fort .....	62
Figure 4.28	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé, réseau fort .....	63
Figure 4.29	Données du contrôle Volt/Var du STATCOM, contrôle décalé, réseau fort .....	63
Figure 4.30	Données du contrôle Volt/Var d'un des deux onduleurs, contrôle simultané, réseau faible .....	64
Figure 4.31	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé, réseau faible .....	64
Figure 4.32	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé, réseau faible .....	65
Figure 4.33	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé avec STATCOM, réseau faible .....	65
Figure 4.34	Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé avec STATCOM, réseau faible .....	66
Figure 4.35	Données du contrôle Volt/Var du STATCOM, contrôle décalé, réseau faible .....	66
Figure 5.1	Topologie classique d'un MLP Tirée de Shirazi, A.S. et Frigaard, I. (2021, p5) .....	70
Figure 5.2	Schéma bloc du modèle d'onduleur utilisé pour obtenir les données utilisées par le MLP .....	75
Figure 5.3	Rampe positive de courant de 10A inductif avec l'onduleur générique ...	78
Figure 5.4	Rampe positive de courant de 20A inductif avec l'onduleur générique ...	78
Figure 5.5	Rampe positive de courant de 10A capacitif avec l'onduleur générique ..	79
Figure 5.6	Rampe positive de courant de 20A capacitif avec l'onduleur générique ..	79
Figure 5.7	Performance de l'IA sur l'estimation de l'impédance réseau en reproduisant les essais expérimentaux .....	80

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETS	École de Technologie Supérieure
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> - Taux de distorsion harmonique
LVRT	<i>Low Voltage Ride-Through</i>
OVRT	<i>Over Voltage Ride-Through</i>
PI	Proportionnel intégral
PLL	<i>Phase Lock Loop</i>
P-Res	Proportionnel-résonant
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulation de largeur d'impulsion
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i> - Point de raccordement
POI	<i>Point of Interconnection</i> - Point de raccordement
AC	<i>Alternative Current</i> - Courant alternatif (ca)
DC	<i>Direct Current</i> - Courant continu (cc)
SCR	<i>Short-Circuit Ratio</i> - Ratio de court-circuit
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> - Erreur moyenne absolue
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i> - Perceptron multicouche
ReLU	<i>Rectified Linear Unit</i>
RMSprop	<i>Root Mean Squared Propagation</i>
IA	Intelligence artificielle



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$\Omega$	Ohm
s	Seconde
A	Ampère
VA	Volt-Ampère
H	Henry
F	Farad
Hz	Hertz
°	Degré
dB	Décibel
V	Amplitude de la tension du réseau et unité de mesure Volt
$\Theta$	Angle du réseau
$\Theta'$	Angle estimé du réseau
$\omega$	Pulsation du réseau
$\omega'$	Pulsation estimée du réseau
$\Phi$	Phase du réseau
$\Phi'$	Phase estimée du réseau
$\epsilon_{pd}$	Erreur de phase entre le système et le réseau
$k_p$	Gain proportionnel d'un compensateur PI ou Résonant (P-Res)
$k_i$	Gain intégral d'un compensateur PI
$\xi$	Facteur d'amortissement de la PLL
$\omega_n$	Pulsation naturelle de la PLL
$\xi_1$	Facteur d'amortissement 1 du filtre Notch
$\xi_2$	Facteur d'amortissement 2 du filtre Notch

$\omega_s$	Pulsation d'encoche du filtre Notch
$i_g$	Courant injecté par l'onduleur dans le réseau
$d$	Signal de référence du modulateur à MLI
$K_{inv}$	Gain total de l'onduleur
$Z_c$	Impédance de la branche capacitive du filtre LCL compris du condensateur C et de la résistance $r_c$
$Z_{L1}$	Impédance de l'inductance $L_1$
$Z_{L2}$	Impédance de l'inductance $L_2$
$Z_g$	Impédance du réseau perçue par l'onduleur comprenant l'inductance $L_g$ et de la résistance $r_g$
$V_{dc}$	Tension du bus DC de l'onduleur
$V_{ac}$	Tension alternative aux bornes de l'onduleur
$k_r$	Gain résonant
$h$	Ordre harmonique
$\omega_r$	Pulsation fondamentale du réseau
$h_{max}$	Ordre harmonique maximal
$H_1$	Gain de la boucle de courant $i_c$
$i_c$	Courant de la branche capacitive du filtre LCL
$r_c$	résistance d'amortissement du filtre LCL
$I_p$	Courant actif de l'onduleur selon le référentiel dq0
$I_q$	Courant réactif de l'onduleur selon le référentiel dq0
$L_1$	Inductance $L_1$ du filtre LCL
$L_2$	Inductance $L_2$ du filtre LCL
$C$	Condensateur de la branche capacitive du filtre LCL
$L_g$	Inductance $L_g$ de l'équivalent Thévenin du réseau

$r_g$	Résistance $r_g$ de l'équivalent Thévenin du réseau
$y_{pi}$	Valeur prédite par le MLP
$y_i$	Valeur réelle du jeu de données pour le MLP
$n$	Nombre de données pour la performance du MLP
$W_n'$	Matrice de nouveaux poids ajustés du MLP
$W_n$	Matrice de poids actuelle du MLP
$\eta$	Taux d'apprentissage du MLP
$\nabla_\mu$	Gradient par rapport aux poids





## INTRODUCTION

Depuis quelques années, les sources d'énergies renouvelables deviennent de plus en plus recherchées avec les enjeux de décarbonation. Ces sources d'énergie peuvent prendre diverses formes, les plus populaires étant l'énergie éolienne et l'énergie solaire EDF (2023). Le présent mémoire traitera de cette deuxième source d'énergie, plus précisément son intégration au niveau résidentiel à l'aide d'onduleurs monophasés et de son impact sur le réseau électrique. Les panneaux photovoltaïques sont une source d'énergie intermittente, ce qui signifie que son apport en puissance n'est pas constant. Cet apport varie grandement en fonction des conditions ambiantes de l'environnement où ils se trouvent. Certains de ces paramètres sont évidemment le niveau d'ensoleillement et la température. Cette variabilité peut avoir un impact notable sur la stabilité du réseau électrique.

Un autre aspect important de cette source d'énergie est sa capacité à rester synchronisée sur le réseau lors d'événements sur celui-ci. En effet, en cas d'intégration massive de ce type de technologie, ceux-ci doivent être en mesure de rester synchronisés sur des excursions de fréquence ou en cas de sous tension (LVRT) et de surtension (OVRT). Un manquement à cette capacité pourrait entraîner une grande perte de capacité de production, ce qui devient de plus en plus problématique en fonction du taux de pénétration. Plusieurs événements décrivant ces problématiques sont approfondis dans NERC (2021), NERC (2022) pour le réseau de transport. C'est pourquoi un bon dimensionnement et une bonne conception à la fois des mesures et de la commande de l'onduleur sont cruciaux pour la stabilité du réseau, et ce même si l'onduleur est raccordé au niveau du réseau de distribution.

Suite à ces observations, ce mémoire traite de la conception d'un onduleur monophasé et de ses potentielles interactions avec un réseau de distribution. Il permet d'établir des stratégies de contrôle optimales afin de tirer profit des bénéfices de cette technologie pour la stabilité du réseau. Plusieurs stratégies seront employées dans le but de maximiser la robustesse de l'onduleur,

afin que celui-ci demeure synchronisé au réseau, et ce, même si le réseau de distribution ou haute tension subit des contingences sévères. Le but de cette démarche est d'obtenir un onduleur agile qui peut s'adapter en fonction des différentes situations possibles sur les réseaux avec ses stratégies. Par exemple, fournir de la puissance réactive afin d'aider à maintenir une tension définie au point de raccordement.

Le premier chapitre de ce mémoire traitera de la conception du contrôle et du choix des composants passifs de l'onduleur résidentiel monophasé qui sera utilisé dans les applications. Ce chapitre décrira en détail la conception et une démonstration de ses performances sera présentée. Le deuxième chapitre traitera de la validation par simulation de la modélisation de l'onduleur et permettra d'attester son fonctionnement selon les spécifications. Le troisième chapitre portera sur les optimisations apportées à l'onduleur monophasé afin d'en améliorer la performance au niveau de son rendement ainsi que sa capacité à fournir un courant injecté dénué d'harmoniques pour plusieurs impédances équivalentes de réseau. Dans le quatrième chapitre, plusieurs onduleurs seront branchés au même point de raccordement. Cette configuration sera simulée et les problématiques qui en découlent analysées. Au cinquième chapitre, l'impédance perçue par l'onduleur, paramètre clé pour assurer sa stabilité, sera estimée à partir d'un réseau de neurones. Finalement, une conclusion résumera les faits saillants de cet ouvrage et proposera des pistes d'améliorations pour de futurs travaux sur le domaine.

## CHAPITRE 1

### MODÉLISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ

Une des grandes tendances depuis les dernières années aux endroits où la production et l'achat d'énergie électrique sont onéreux est l'autoproduction. En effet, l'idée de produire sa propre énergie à l'aide de divers moyens afin de réduire sa consommation énergétique est de plus en plus attrayante aux endroits où celle-ci est dispendieuse à acheter des fournisseurs locaux comme discuté dans Brill & Tynan (2023). Une de ces sources disponibles afin de produire localement et qui est souvent utilisée sont les panneaux photovoltaïques couplés à un onduleur monophasé relié au réseau électrique du distributeur local. Ce premier chapitre se concentrera donc sur l'établissement d'un modèle d'onduleur monophasé, qui sera utilisé dans ce mémoire ainsi que ses différentes composantes.

#### 1.1 Présentation du système global

L'onduleur monophasé utilisé dans le cadre de ce mémoire possède plusieurs parties importantes. Chacune de ces parties sera détaillée au sein de ce chapitre. De manière générale, le premier bloc de l'onduleur est ce qui est communément appelé *phase lock loop* (boucle à verrouillage de phase) ou encore PLL. La PLL est en fait un système de contrôle permettant de s'assurer que le courant injecté dans le réseau soit en phase avec la tension de celui-ci. Si ce n'est pas le cas, le courant injecté présentera une composante réactive qui, dans la majorité des endroits, ne génère aucun revenu n'étant pas une puissance pouvant effectuer un travail utile. De plus, dépendamment du niveau de déphasage entre le courant injecté et la tension du réseau, la puissance réactive injectée va venir influencer la tension aux bornes de l'onduleur, ce qui peut compliquer la gestion de la tension sur la ligne de distribution si la quantité d'onduleurs est assez importante.

La deuxième partie principale est ce que l'on désigne comme la commande de l'onduleur. C'est à ce niveau que le contrôle permettant d'injecter la quantité désirée de courant est commandé. De là est émis un signal PWM servant d'entrée à la prochaine partie : le pont d'IGBT

ou de MOS. Ce signal PWM permet de faire commuter les IGBT qui sont responsables de générer la référence de courant qui sera injecté sur le réseau. Ce courant, fortement harmonique, se retrouve ensuite dans un filtre LCL qui permet d'effectuer le lissage. La dernière partie du système global est l'impédance du réseau qui symbolise le réseau de distribution qui se retrouve en amont de l'onduleur monophasé. On peut observer le système dans son ensemble à haut niveau sur la figure 1.1.

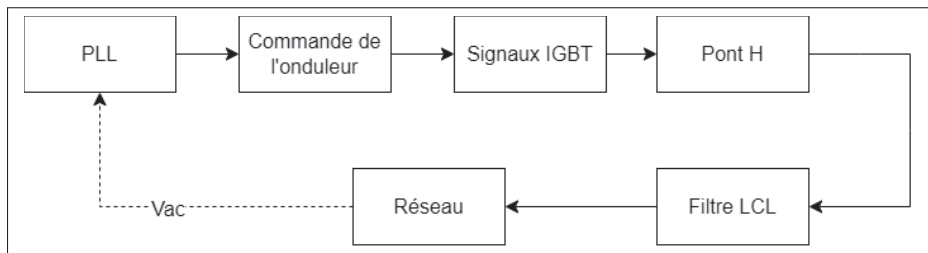


Figure 1.1 Modèle complet de l'onduleur monophasé

## 1.2 Boucle à verrouillage de phase

La boucle de verrouillage de phase est une partie cruciale au bon fonctionnement de l'onduleur. Cette boucle sert à s'assurer que le courant généré par l'onduleur est en phase avec la tension du réseau. Une désynchronisation du courant de l'onduleur par rapport à la tension du réseau entraîne une injection de courant réactif sur le réseau, ce qui n'est pas souhaitable si elle n'est pas désirée et contrôlée. En effet, c'est la puissance active qui permet d'effectuer un travail et qui, par le fait même, répond au besoin d'autoproduction. De plus, une désynchronisation peut, dépendamment de la stratégie de contrôle, entraîner un comportement erratique de l'équipement voire sa déconnexion du réseau ainsi qu'une perturbation sur le réseau de distribution. Il est donc important de maintenir cette synchronisation afin de tirer profit au maximum des installations de production locales tout en assurant un comportement prévisible des équipements.

Le système du PLL est représenté à la figure 1.2. Il prend en entrée la tension du réseau au point de raccordement de l'onduleur. Le signal d'entrée de la tension est ensuite envoyé dans un dans un filtre de Notch adaptatif. Ce filtre permet d'atténuer la composante haute fréquence comme

expliqué dans Bruyant-Rozoy (2019). Une fois la composante haute fréquence filtrée, le signal poursuit sa progression à travers un régulateur proportionnel intégral (PI) où on vient ensuite ajouter la pulsation du réseau. Finalement, le résultat de cette addition, qui est une pulsation, est à la fois appliqué en entrée du filtre Notch adaptatif et intégré pour obtenir l'angle estimé du réseau. Cet angle est ensuite multiplié par la fonction trigonométrique cosinus. Ce résultat sert de rétroaction en boucle fermée pour calculer l'erreur de l'angle estimé. Comme démontré dans Bruyant-Rozoy (2019), le système présente les variables suivantes :

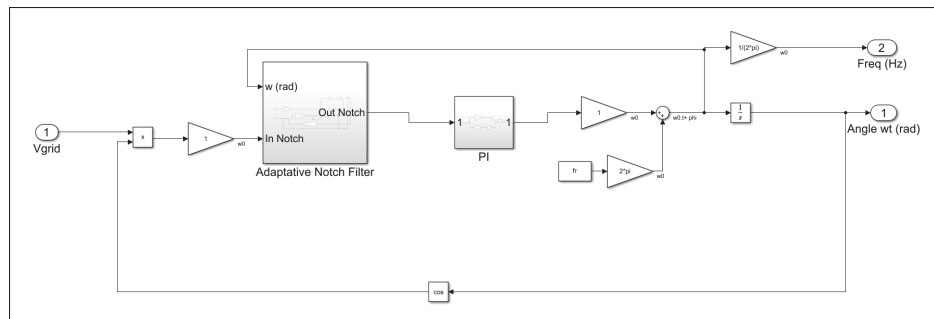


Figure 1.2 Boucle à verrouillage de phase

$$v(t) = V \sin(\theta) \quad (1.1)$$

$$v'(t) = \cos(\theta') \quad (1.2)$$

avec :

$$\theta = \omega t + \phi \quad (1.3)$$

$$\theta' = \omega' t + \phi \quad (1.4)$$

Où  $V$  : amplitude de la tension du réseau

$\theta$  et  $\theta'$  : angle du réseau et angle estimé

$\omega$  et  $\omega'$  : pulsation du réseau et pulsation estimée

$\phi$  et  $\phi'$  : phase du réseau et phase estimée

Dans le cas du PLL utilisé, le calcul de l'erreur est constitué de la multiplication entre la tension d'entrée et la tension de sortie grâce à la structure de la commande. Ceci est illustré à la figure 1.2 . On obtient donc l'équation suivante en combinant les équations 1.1 à 1.4 :

$$\epsilon_{pd} = v(t) \cdot v'(t) = V \sin(\theta t + \phi) \cdot \cos(\theta' t + \phi') \quad (1.5)$$

En utilisant les propriétés trigonométriques, il est possible de remodeler l'équation 1.5 pour la mettre sous la forme suivante :

$$\epsilon_{pd} = \frac{V}{2} \cdot [\sin((\omega + \omega')t + (\phi + \phi')) + \sin((\omega - \omega')t + (\phi - \phi'))] \quad (1.6)$$

Cette nouvelle équation possède plusieurs attributs intéressants. Premièrement, il est possible par inspection de voir que l'erreur de phase que l'on désire obtenir est disponible ( $\phi - \phi'$ ) . De plus, le premier terme en sinus indique une composante au double de la fondamentale du réseau, soit 120 Hz. ( $\sin((\omega + \omega')t + (\phi + \phi'))$ ) Ce terme peut être négligé, dû à la présence du filtre Notch adaptatif, ce qui réduit grandement l'équation. Il est possible de négliger ce terme correspondant à une fréquence de 120 Hz en exploitation normale de l'onduleur, car le filtre Notch adaptatif a une fréquence de coupure adaptative correspondant à deux fois la fréquence du réseau. Celle-ci sera donc toujours atténuée, ce qui permet de réécrire l'équation 1.6 de la façon suivante :

$$\epsilon_{pd} = \frac{V}{2} \cdot \sin(\phi - \phi') \quad (1.7)$$

On possède désormais, avec l'équation 1.7, une solution permettant de déterminer quelle est l'erreur de phase entre notre système et celle du réseau. Par contre, une contrainte demeure, car l'équation 1.7 possède des termes non linéaires (les fonctions en sinus). Il est possible, en supposant que l'erreur de phase est faible, d'appliquer l'approximation des *petits angles*. Cette approximation consiste à supposer que la différence entre les angles est assez réduite en amplitude, soit que le sinus d'une différence entre les angles soit très similaire à la différence entre les angles eux-mêmes. Cette approximation peut être représentée mathématiquement par l'équation suivante :

$$\sin(\phi - \phi') \approx \phi - \phi' \approx \theta - \theta' \quad (1.8)$$

Grâce à cette approximation, on peut donc résumer l'erreur de phase par une équation linéaire simple, soit :

$$\epsilon_{pd} = \frac{V}{2} \cdot (\theta - \theta') \quad (1.9)$$

Une fois cette relation connue, il est possible de représenter le système sous sa forme petit signal afin de déterminer la fonction de transfert de celui-ci. La démonstration complète de la modélisation petit signal peut être consultée dans Bruyant-Rozoy (2019). La fonction de transfert résultante est :

$$H_{PLL}(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{k_{in}k_p \cdot s + k_{in}k_i}{s^2 + k_{in}k_p \cdot s + k_{in}k_i} \quad (1.10)$$

Par association, il est possible de diviser cette fonction en plusieurs termes qui s'apparentent à une fonction de transfert d'ordre 2 qui possède la forme suivante :

$$H_{PLL}(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.11)$$

Il suffit donc de comparer les fonctions 1.10 et 1.11 afin de déterminer les équivalences entre elles. Cela permet facilement de quantifier l'impact que les paramètres  $k_p$  et  $k_i$  auront sur l'amortissement et la pulsation naturelle de la PLL. Les relations par association sont les suivantes :

$$k_p = \frac{2\xi\omega_n}{k_{in}} \quad (1.12)$$

$$k_i = \frac{\omega_n^2}{k_{in}} \quad (1.13)$$

$$\xi = \frac{k_{in}k_p}{2\sqrt{k_{in}k_i}} \quad (1.14)$$

$$\omega_n = \sqrt{k_{in}k_i} \quad (1.15)$$

Ces relations entre les paramètres permettent d'effectuer le dimensionnement de la PLL afin que celle-ci ait le comportement désiré. Les deux paramètres majeurs qui doivent être ajustés sont le temps de réponse du système et le dépassement. La démonstration mathématique des relations entre le système et les paramètres sélectionnés est démontrée dans Bruyant-Rozoy (2019) ainsi que la méthodologie pour arriver aux choix retenus. Les paramètres qui sont utilisés pour le cas initial sont les suivants :

$$\xi = 0,65 \quad (1.16)$$

$$\omega_n = 160 \text{ rad/s} \quad (1.17)$$

$$k_p = 2,31 \quad (1.18)$$

$$k_i = 284,4 \quad (1.19)$$



Ces paramètres permettent d'obtenir une réponse conforme aux choix de conception du système en termes de dépassement et de temps de réponse. Par contre, un problème déjà abordé dans cette section persiste. En fait, le signal d'erreur de la PLL contient un terme à plus haute fréquence, soit à deux fois la fréquence naturelle du réseau. Il s'agit du terme  $\sin(\omega + \omega')t + (\phi + \phi')$ . La structure inhérente du système fournit une faible bande passante qui contribue à atténuer cette composante. Par contre, il faut l'atténuer davantage si on veut éliminer le risque de voir apparaître une oscillation à cette fréquence en sortie au système. Afin d'établir cette atténuation, une composante additionnelle sera ajoutée au PLL, soit un filtre adaptatif Notch. En raison de sa sélectivité, ce filtre permet d'obtenir une grande atténuation à une fréquence spécifique, tout en ayant un impact minime sur les fréquences avoisinantes. Le diagramme de Bode représentant le comportement du filtre est illustré à la figure 1.3. Celui-ci possède un gain de -3 dB à une fréquence de 50,5 Hz.

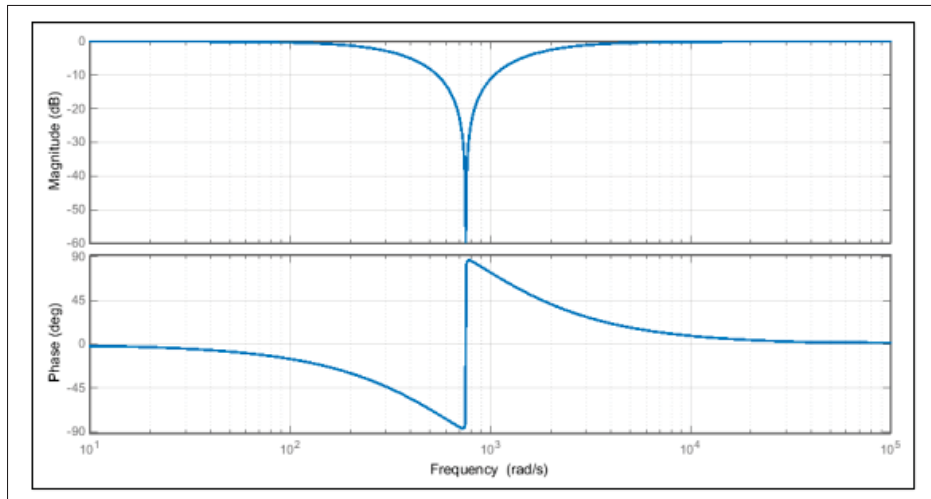


Figure 1.3 Diagramme de Bode du filtre Notch adaptatif centré à 2 fois la fréquence du réseau

La fréquence qui est la plus atténuée est désignée comme étant la fréquence d'encoche. Ce filtre possède la fonction de transfert suivante :

$$H_{Notch}(s) = \frac{s^2 + 2\xi_1\omega_s s + \omega_s^2}{s^2 + 2\xi_2\omega_s s + \omega_s^2} \quad (1.20)$$

Où  $\xi_1$  et  $\xi_2$  sont les variables à ajuster pour obtenir la bande passante qui sera atténuée et  $\omega_s$  représente la pulsation d'encoche, fréquence à laquelle l'atténuation sera maximale. Dans le cas de la conception proposée, les paramètres  $\xi_1$  et  $\xi_2$  ont été fixés à 0,001 et 1 respectivement. Également,  $\omega_s$  est fixée à une valeur de 754 rad/s qui représente deux fois la valeur théorique de la pulsation du réseau de 60 Hz. Cela permet d'atténuer correctement l'oscillation naturelle produite par la PLL à cette fréquence. Toutefois, le filtre adaptatif de Notch diffère d'un filtre Notch traditionnel où la pulsation d'encoche de celui-ci n'est pas fixe. En effet, celui-ci utilise la pulsation du réseau estimée par la PLL afin de centrer son atténuation. Cela a pour effet de garder une bonne atténuation de la composante à deux fois la fréquence du réseau, et ce, même lorsque la fréquence du réseau varie. La structure du filtre adaptatif de Notch peut être observée à la figure 1.4. Les calculs du dimensionnement afin d'optimiser les paramètres  $\xi_1$  et  $\xi_2$  sont présentés dans Bruyant-Rozoy (2019). La sélection finale des paramètres d'amortissement qui seront utilisés dans ce travail est

$$\xi_1 = 1 \cdot 10^{-6} \quad (1.21)$$

$$\xi_2 = 0,9 \quad (1.22)$$

La sortie du filtre adaptatif de type Notch est injectée à l'entrée du régulateur PI de la PLL qui fournira ensuite la nouvelle mesure de l'angle pour la référence du courant. Si l'on résume, voici les paramètres de la PLL qui seront utilisés dans ce travail :

$$\xi = 0,65 \quad (1.23)$$

$$\omega_n = 160 \text{ rad/s} \quad (1.24)$$

$$k_p = 2,31 \quad (1.25)$$

$$k_i = 284,4 \quad (1.26)$$

$$\xi_1 = 1 \cdot 10^{-6} \quad (1.27)$$

$$\xi_2 = 0,9 \quad (1.28)$$

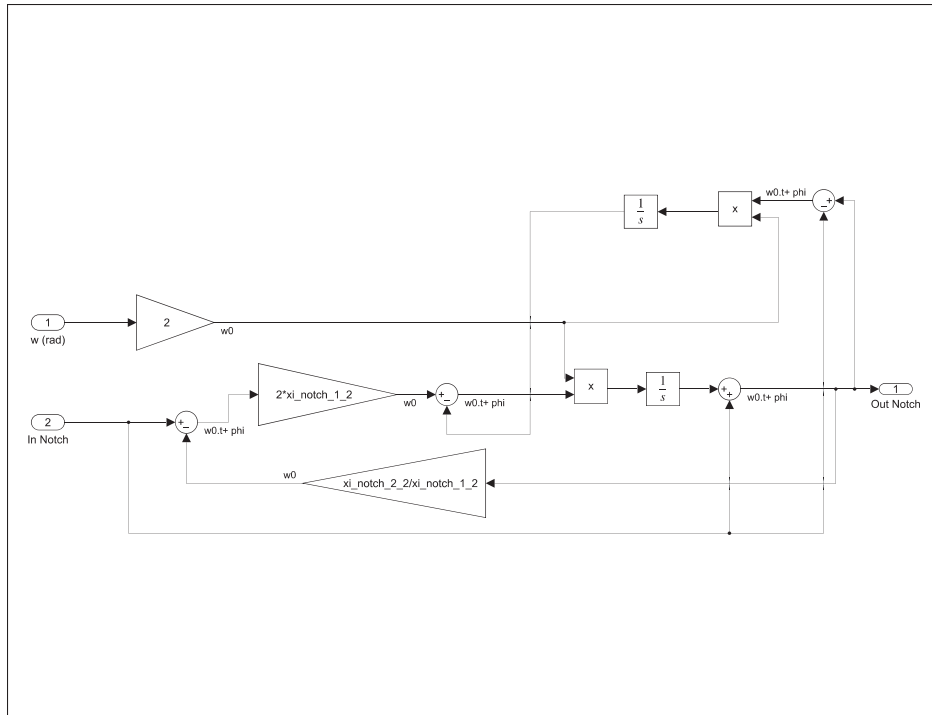


Figure 1.4 Schéma bloc du modèle représentant le filtre Notch adaptatif

### 1.3 Commande de l'onduleur

Afin de permettre le raccordement de l'onduleur au réseau de distribution électrique, il est nécessaire qu'il soit en mesure de respecter les exigences de raccordement qui y sont associées. En effet, le raccordement au PCC présente des exigences en matière de performance afin que les onduleurs n'injectent pas un niveau d'harmoniques trop élevé diminuant du même coup la qualité de l'onde. D'autres critères spécifient également la contribution que l'onduleur doit respecter en termes de courant réactif et les performances de celui-ci en cas d'excursion de tension et de fréquence. Dans le cadre de ce mémoire, le standard IEEE 1547-2018 IEE (2018) sera utilisé afin de juger de la performance de l'onduleur sur cet aspect. Pour s'assurer de respecter ces exigences, la commande de l'onduleur doit être bien ajustée. Elle devra s'assurer de permettre au système d'être stable en régime permanent et transitoire, tout en rejetant les harmoniques présents sur la tension du réseau. Il est important que la réjection d'harmoniques de l'onduleur soit efficace, car la tension du réseau possède des harmoniques qui peuvent nuire au contrôle

de l'onduleur. Ces harmoniques s'introduisent dans le contrôle par le biais de la référence de tension de l'onduleur. Ainsi, si la réjection d'harmoniques est inefficace, ceux-ci se retrouveront dans le courant injecté sur le réseau, venant affecter le THD de celui-ci qui ne doit pas dépasser 5% selon les exigences de la IEEE 1547-2018.

Afin de permettre un tel contrôle, il est important d'établir la fonction de transfert représentant le système complet une fois le signal de commande reçu. En effet, la fonction de transfert doit comprendre tous les éléments entre le signal de commande et le courant injecté sur le réseau afin d'être en mesure de bien évaluer la réponse du système. Les schémas blocs du dit système sont présentés sur les figures 1.5 à 1.8. La fonction de transfert représentant le comportement entre le signal d'entrée de la commande et le courant injecté sur le réseau est la suivante :

$$T_{t,gt}(s)|_{v_s=0} = \frac{i_g(s)}{d(s)} = K_{inv} \cdot \frac{Z_c}{Z_c(Z_{L1} + Z_{L2} + Z_g) + Z_{L1}(Z_{L2} + Z_g)} \quad (1.29)$$

Où :

$i_g(s)$  = courant injecté dans le réseau

$d(s)$  = signal d'entrée à la commande

$K_{inv}$  = gain total de l'onduleur

$Z_c$  = Impédance de la branche capacitive du condensateur du filtre LCL compris de la résistance  $r_c$  et du condensateur C

$Z_{L1}$  = Impédance de l'inductance  $L_1$

$Z_{L2}$  = Impédance de l'inductance  $L_2$

$Z_g$  = Impédance de l'impédance du réseau perçue par l'onduleur compris de  $r_g$  et  $L_g$

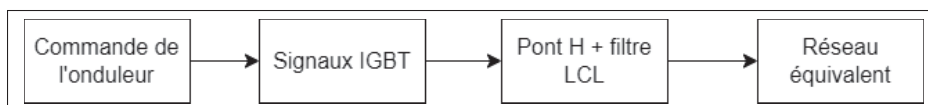


Figure 1.5 Schéma bloc du modèle représentant le contrôle haut niveau de l'onduleur ainsi que l'équivalent réseau

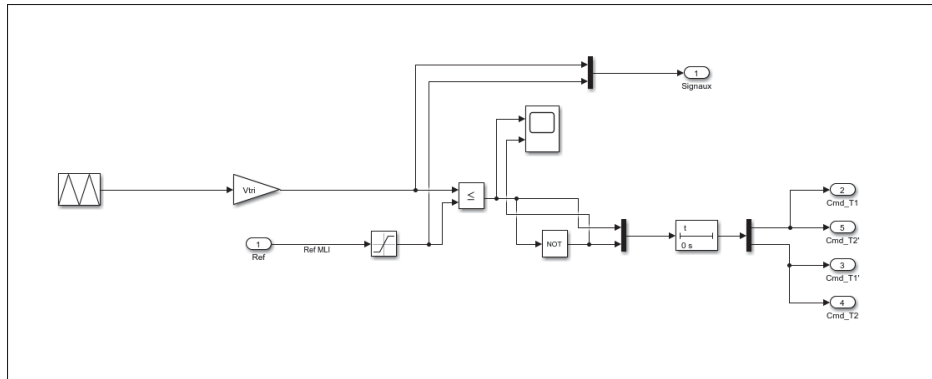


Figure 1.6 Schéma bloc du modèle représentant la génération des signaux de commande envoyés aux 4 IGBT

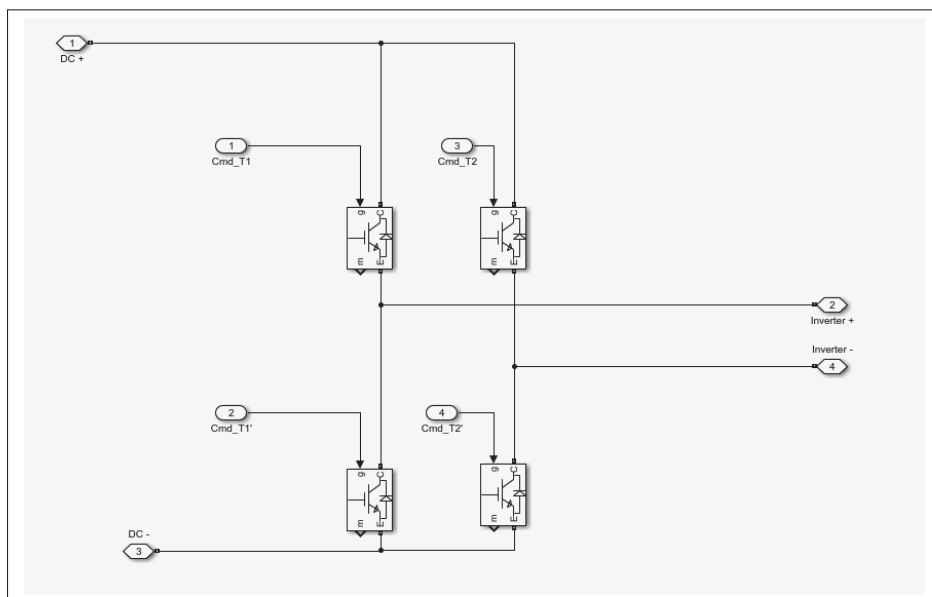


Figure 1.7 Schéma bloc du modèle en commutation représentant le pont d'IGBT de l'onduleur

Avant d'aborder l'analyse détaillée de l'onduleur, il est important d'établir une hypothèse. La tension du bus DC de l'onduleur est considérée constante, soit  $V_{DC} = 230V$ . Cette hypothèse permet de négliger la boucle de contrôle plus lente servant à s'assurer que la tension du bus DC demeure quasi constante. Cette hypothèse permet de simplifier le contrôle de l'onduleur et demeure valide tant que les phénomènes analysés ne sont pas affectés par la dynamique du bus DC.

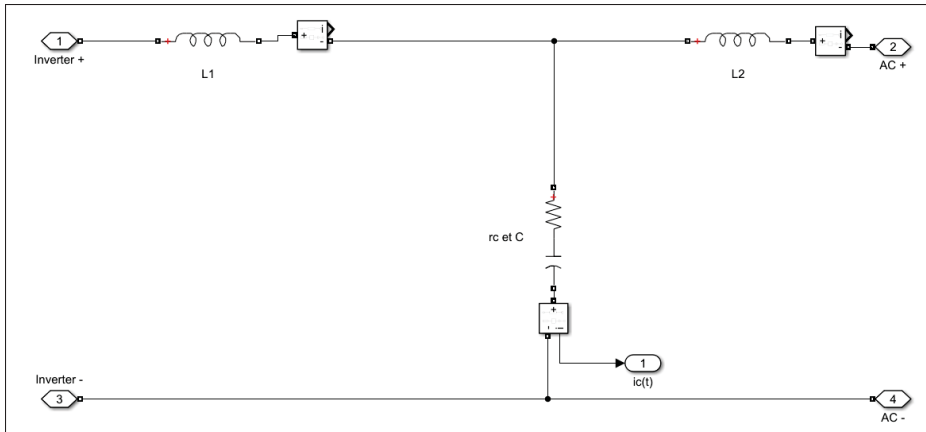


Figure 1.8 Schéma bloc du modèle représentant le filtre LCL de l'onduleur

Suite à l'établissement de cette hypothèse, certains enjeux restent à régler pour la conception de l'onduleur. Un des premiers problèmes que l'on doit envisager à corriger est l'atténuation des harmoniques présentes sur le réseau auquel l'onduleur est raccordé. Afin d'y parvenir, il est possible d'utiliser des compensateurs résonants en parallèle afin de s'assurer que le gain à ces fréquences de résonances soit extrêmement élevé. Évidemment, ces fréquences de résonances seront choisies afin d'être les mêmes que les harmoniques du réseau, soit des multiples de 60Hz. Ces compensateurs contribueront à la qualité de l'onde de courant générée par l'onduleur. Un terme proportionnel est aussi ajouté pour améliorer la stabilité et le temps de réponse du système comme dans Bruyant-Rozoy (2019). L'équation représentant plusieurs compensateurs proportionnel-résonant (P-Res) idéaux est la suivante :

$$G_{PR,ideal}(s) = k_p + \sum_{h=1,3,\dots}^{h_{max}} \frac{2k_r s}{s^2 + (h\omega_r)^2} \quad (1.30)$$

où :

$k_r$  : gain résonant

$k_p$  : gain proportionnel

$h$  : ordre de l'harmonique

$\omega_r$  : pulsation fondamentale

Malheureusement, comme démontré dans Zmood & Holmes (1999), un compensateur P-res idéal n'est pas réalisable en pratique. De plus, comme mentionnés dans Bruyant-Rozoy (2019), des problèmes avec la stabilité du système peuvent survenir si un compensateur P-res idéal était utilisé en pratique. Cet enjeu provient du gain infini du P-res idéal à la fréquence fondamentale, où tout signal possédant cette fréquence serait amplifié à des valeurs très élevées. C'est pour cela qu'il convient d'introduire un terme d'amortissement  $\xi$  afin de représenter un compensateur P-Res non idéal. Ce terme a pour impact que le gain à la pulsation fondamentale ( $\omega_n$ ) n'est plus infini, mais permet tout de même d'avoir un gain assez élevé pour atteindre une valeur statique nulle en régime permanent dans le système. Un autre bienfait de l'ajout de ce facteur d'amortissement est l'élargissement de la bande passante du compensateur P-Res, ce qui améliore sa performance lors d'un changement de fréquence du système. La fonction représentant le compensateur P-res non idéal est donnée par l'équation (1.31) comme démontré dans Bruyant-Rozoy (2019) :

$$G_{PR,nonideal}(s) = k_p + \sum_{h=1,3,\dots}^{h_{max}} \frac{2k_r \xi (h\omega_r) s}{s^2 + 2\xi (h\omega_r)^2} \quad (1.31)$$

Le compensateur P-Res non idéal permet d'atténuer les harmoniques présentes dans la tension de référence du réseau. Par contre, malgré l'ajout de ces compensateurs, le système possède toujours une marge de phase négative en boucle ouverte tel qu'illustré à la figure 1.9, ce qui indique une instabilité du système pour le contrôle en boucle fermée. Bruyant-Rozoy (2019)

Afin de pallier ce problème, une autre boucle de contrôle sera implémentée dans le système en se référant aux travaux de Ruan *et al.* (2018) qui utilisent le courant  $i_c$  de la branche capacitive du filtre LCL. Cette méthode permet d'avoir une atténuation de la fréquence de résonance du filtre LCL sans avoir d'éléments passifs d'une envergure trop importante. En effet, ceci occasionnerait des pertes supplémentaires pour l'onduleur. Cette méthode d'amortissement est communément

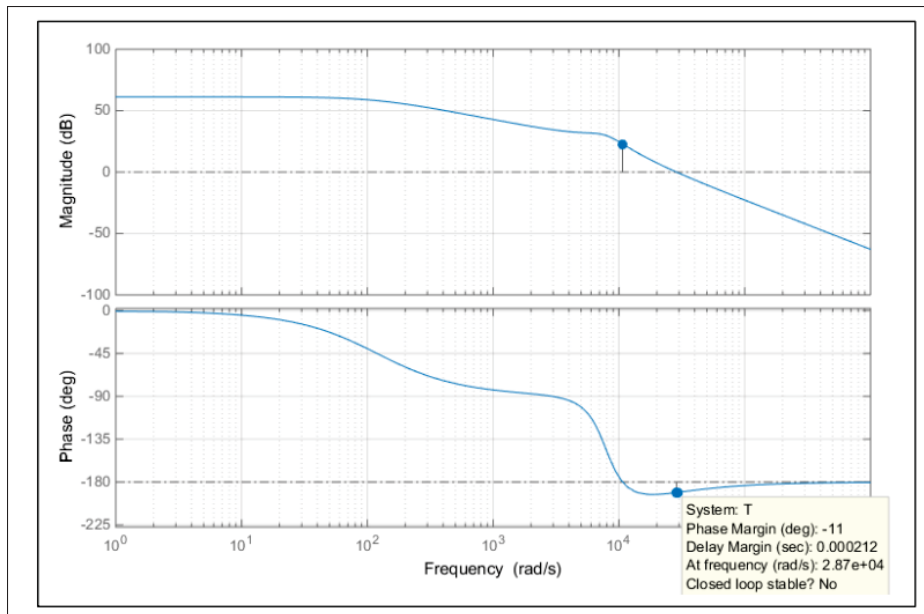


Figure 1.9 Diagramme de Bode de la fonction de transfert de l'onduleur raccordé au réseau  
Tirée de Bruyant-Rozoy (2019)

désignée comme de l'amortissement actif. Le courant  $i_c$  possède alors un gain  $H_1$  sur son signal de retour vers le contrôle. En ajoutant cette rétroaction, le système possédera une boucle interne avec le courant  $i_c$  et le gain  $H_1$  et une boucle externe avec le courant  $i_g$ . L'ajout de la boucle interne a pour effet d'altérer la réponse en fréquence du système complet et de rendre la marge de phase positive. Avec cette nouvelle marge de phase positive, on peut s'attendre maintenant à ce que le contrôle en boucle fermée soit stable.

Dans le cas de notre modèle, il est intéressant d'analyser un dimensionnement de la commande possédant une compensation harmonique tel que détaillé dans Bruyant-Rozoy (2019). Cette commande s'effectue en ajoutant plusieurs compensateurs résonnants en parallèle qui sont conçus afin que leur fréquence de résonance soit égale aux fréquences des harmoniques à compenser. Cette méthode de compensation amène l'introduction d'une variable supplémentaire au niveau de la commande, soit  $h_{max}$  qui représente l'ordre maximal des harmoniques pouvant être compensés. En effet, plus  $h_{max}$  est grand, plus la fréquence de l'harmonique la plus élevée qui doit être compensée se rapproche de la fréquence où le système possède un gain de 0dB.



Étant donné que la marge de phase du système est évaluée à cette fréquence, cela se traduit alors par le fait que tenter d'atténuer une harmonique avec une fréquence trop élevée rendra le système instable (marge de phase négative). Par contre, il est à noter que les compensateurs P-Res influencent la phase autour de la fréquence cible seulement. Donc, ce sera le compensateur résonnant le plus proche de la fréquence de croisement à 0 dB qui risque d'avoir un impact sur la stabilité finale du système, d'où l'importance du choix du paramètre  $h_{max}$ .

Le détail des itérations et la méthodologie afin d'obtenir des paramètres optimaux sont présentés dans Bruyant-Rozoy (2019). À des fins de simplicité pour ce mémoire, le modèle utilise certains paramètres de Bruyant-Rozoy (2019) comme valeurs de base. Les paramètres sont présentés au tableau 1.1.

Tableau 1.1 Paramètres de commande pour le dimensionnement avec compensation harmonique

Paramètres	Valeur
Gain proportionnel $k_p$	2,8
Gain résonnant $k_r$	377
Facteur d'amortissement $\xi$	0,002
Ordre maximal des harmoniques à compenser $h_{max}$	7
Coefficient proportionnel sur le retour de courant capacitif $H_1$	0,75

À la sortie de ce contrôleur sera généré un signal PWM qui sera transmis à la prochaine section, soit le pont en H. À noter que ce signal est limité à  $\pm 98\%$  d'amplitude afin de s'assurer que le pont ne se retrouve pas dans une situation de saturation si le signal de commande dépasse les limites de  $\pm 98\%$ . L'ordre de commutation de chacun des IGBT est géré par un comparateur qui compare une onde triangulaire à la fréquence de commutation et le signal de commande reçu. Ensuite, le signal généré par la comparaison entre les deux signaux est inversé afin d'obtenir deux signaux complémentaires servant chacun à commuter une paire d'IGBT. La logique peut être observée à la figure 1.5.

## 1.4 Pont en H à IGBT

Le signal PWM émis par la commande se retrouve à l'entrée du pont en H afin de permettre aux IGBT de commuter pour générer le courant alternatif. Ceux-ci prennent en entrée la tension du bus DC et par leur ordre de commutation modulent le courant DC afin de générer une onde alternative à 60 Hz en phase avec la tension du réseau. Comme hypothèse au niveau de la modélisation et à moins d'indications contraires pour certaines parties de ce mémoire, la résistance de conduction des IGBT est supposée nulle. De plus, la résistance et la capacitance d'amortissement de l'IGBT sont supposées infinies. Le pont d'IGBT est illustré à la figure 1.7. La forme d'onde générée par la commutation des IGBT est toutefois riche en harmoniques et doit être lissée afin d'obtenir une forme d'onde acceptable à injecter sur le réseau alternatif. C'est le rôle du filtre LCL décrit dans la prochaine section.

## 1.5 Filtre LCL et réseau équivalent

Cette section du convertisseur reçoit en entrée la forme d'onde de tension résultante de la commutation des IGBT. Cette onde est remplie d'harmoniques et doit être filtrée afin d'obtenir un courant ayant un niveau de THD acceptable. Ce filtre sert donc à prendre cette onde et la convertir en une forme d'onde sinusoïdale possédant l'amplitude désirée et dénuée au maximum d'harmoniques. Une fois le filtrage réalisé par le filtre LCL, le courant résultant est injecté dans le réseau modélisé par un équivalent Thévenin avec une résistance et une réactance équivalente ainsi qu'une source de tension idéale de 120V. Les valeurs de la résistance et de la réactance Thévenin peuvent être ajustées afin de représenter divers cas réseau qui se traduisent ultimement par un changement d'impédance du point de vue de l'onduleur. Les schémas blocs représentant ces modèles sont illustrés aux figures 1.5 et 1.8. Cette technique permet d'analyser le comportement de celui-ci dans divers cas de figure, sans toutefois avoir besoin de modéliser le réseau de distribution dans son ensemble. Cette approche sera utilisée à maintes reprises afin d'évaluer la performance de l'onduleur dans plusieurs situations.

## **1.6 Conclusion du chapitre 1**

Les différents composants de l'onduleur monophasé ont été décortiqués dans ce chapitre et la théorie derrière plusieurs choix de conception y a été résumé. De cette théorie et de ces calculs en découle un modèle d'onduleur monophasé où le fonctionnement théorique devrait être assuré. Par contre, certains essais doivent être réalisés avant d'attester du bon fonctionnement de celui-ci. En effet, plusieurs essais simulant des événements sur le réseau auquel l'onduleur sera raccordé seront effectués afin de s'assurer que l'onduleur est en mesure de maintenir un comportement dynamique acceptable suite à des perturbations ainsi qu'en régime permanent. Des changements de consignes de l'onduleur seront aussi simulés pour cette même raison. C'est le sujet du prochain chapitre où ces essais seront réalisés et la performance de l'onduleur validée.



## CHAPITRE 2

### ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ

La section précédente a permis d'établir le fondement théorique de la conception de l'onduleur qui sera utilisé dans les prochaines sections de ce travail. Plusieurs concepts théoriques ont été abordés afin d'établir une bonne compréhension du fonctionnement du système. Ce fonctionnement sera validé dans la présente section. Les résultats seront ensuite analysés afin de s'assurer que le système répond bien aux critères de performances. Ceux-ci seront aussi présentés lors de ce chapitre. Finalement, le bon fonctionnement du modèle sera prouvé et l'on pourra poursuivre avec des essais plus élaborés afin d'établir les limites de la conception actuelle. Pour commencer, il y aura dans cette section 4 essais principaux permettant d'établir que le système présente un comportement robuste face à des événements extérieurs. Chacun des essais fera l'objet de sa propre section. Une synthèse des résultats sera finalement présentée à la fin pour conclure le chapitre.

#### 2.1 Rampe de courant

Le premier essai qui sera effectué sur le modèle est la réponse du système pour une rampe de courant, autant positive que négative. Lors de cet essai, on cherche à déterminer si le système demeure stable suite à un changement de consigne. Deux changements seront simulés, soit une hausse de 10A sur la consigne et une baisse de 10A. La performance de l'onduleur sera évaluée sur la capacité de sa PLL à demeurer synchroniser au réseau et à maintenir un THD de courant injecté inférieur à 5% comme spécifié dans la norme IEEE-1547. Afin d'effectuer l'essai, la consigne en régime permanent de l'onduleur est fixée à 15A avant le début de l'essai. Pour la rampe positive, nous établissons une rampe où en 1 seconde, l'onduleur doit atteindre la valeur de consigne de 25A, donc une rampe de 10A/s. Le même principe s'applique pour la rampe négative, où l'onduleur doit atteindre une valeur de 5A après 1s, soit une rampe de -10A/s. Le courant, la tension et le THD de chacun d'eux pour une rampe positive de 10A en 1 seconde peuvent être observés à la figure 2.1.

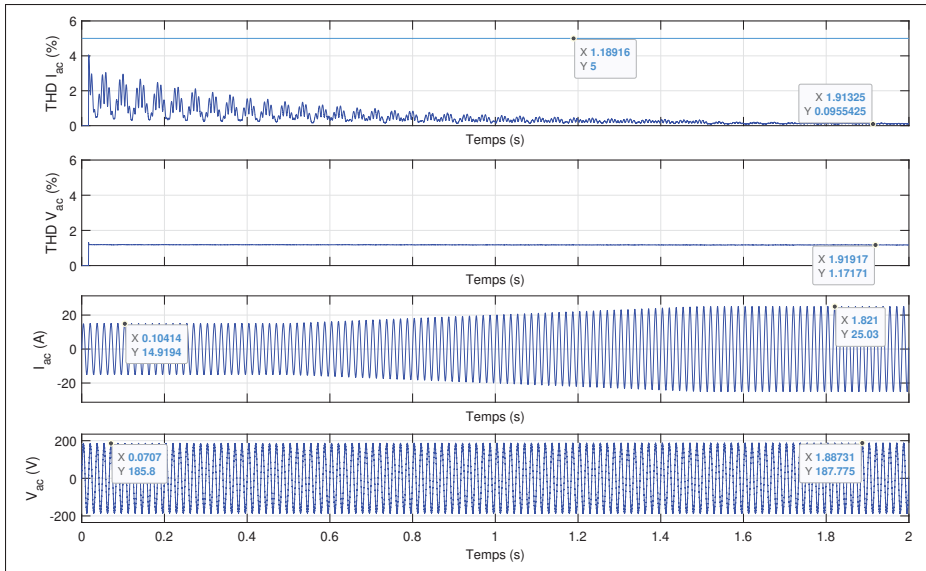


Figure 2.1 Rampe positive de courant de 15A à 25A

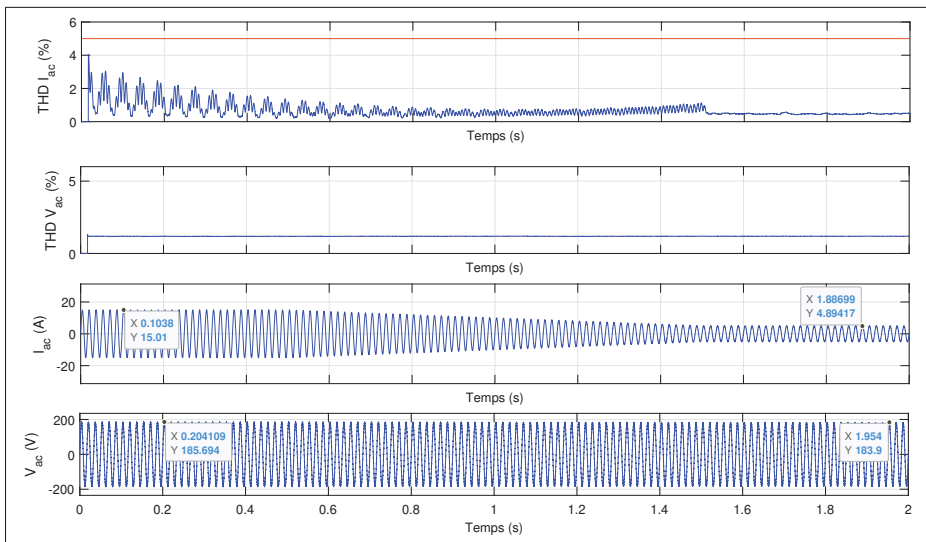


Figure 2.2 Rampe négative de courant de 15A à 5A

Il est possible d'observer sur la figure 2.1 du haut vers les bas, le THD du courant injecté dans le réseau par l'onduleur, le THD de la tension du réseau, le courant injecté dans le réseau et la tension du réseau. Pour la rampe positive, il est possible de constater que le THD du courant demeure sous le seuil de 5% pour un changement de la consigne de 15A à 25A en 1 seconde.

L'onduleur est donc en mesure de faire face à ce changement grâce à son contrôle. On peut observer le même phénomène sur la figure 2.2 pour une rampe négative de 15A vers 5A en 1 seconde.

## 2.2 Échelon de tension

Le deuxième essai qui est effectué sur l'onduleur monophasé est l'échelon de tension. Cet essai consiste à varier soudainement la tension du réseau de 180V crête à 90V crête simulant ainsi un événement sur le réseau auquel est relié l'onduleur. Le critère de passage de cet essai est que le courant injecté dans le réseau possède un THD inférieur à 5%. On peut observer le résultat de cet essai dans la figure 2.3. Comme on peut le constater sur la figure 2.3, le THD du courant injecté

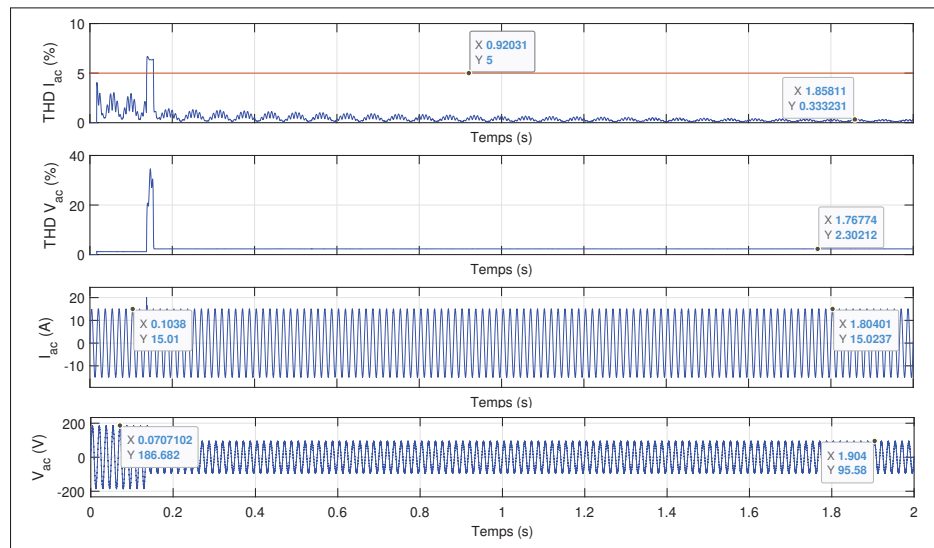


Figure 2.3 Échelon de tension de 180V à 90V

ne dépasse pas 5% suite à la perturbation. Cela signifie que l'onduleur, grâce à son contrôle, réussit à demeurer synchronisé au réseau et continue d'injecter de la puissance dans celui-ci. L'onduleur est donc fonctionnel en présence de variation rapide de la tension du réseau.

### 2.3 Échelon de fréquence

Le troisième essai qui sera effectué sur l'onduleur monophasé est l'échelon de fréquence. Cet essai consiste à faire varier soudainement la fréquence du réseau de 60Hz à 60.5Hz. Ce changement permet de simuler un événement sévère occasionnant un déséquilibre entre la charge et la production sur le réseau auquel est relié l'onduleur. Dans le cas d'une hausse de fréquence, la production se retrouve plus grande que la charge et l'inverse pour une baisse de fréquence Duncan, Sarma & Overbye (2008). Le critère de passage de cet essai est toujours que le courant injecté dans le réseau possède un THD inférieur à 5%. On peut observer les mêmes résultats que les essais précédents à la figure 2.4 ainsi qu'une comparaison entre la tension du réseau et la phase obtenue par la PLL à la figure 2.5. À noter qu'un facteur multiplicatif est appliqué au sinus reconstitué avec la phase obtenue de la PLL afin de faciliter la comparaison de phase des deux signaux. Il est possible de constater que le THD du courant injecté dans le réseau demeure

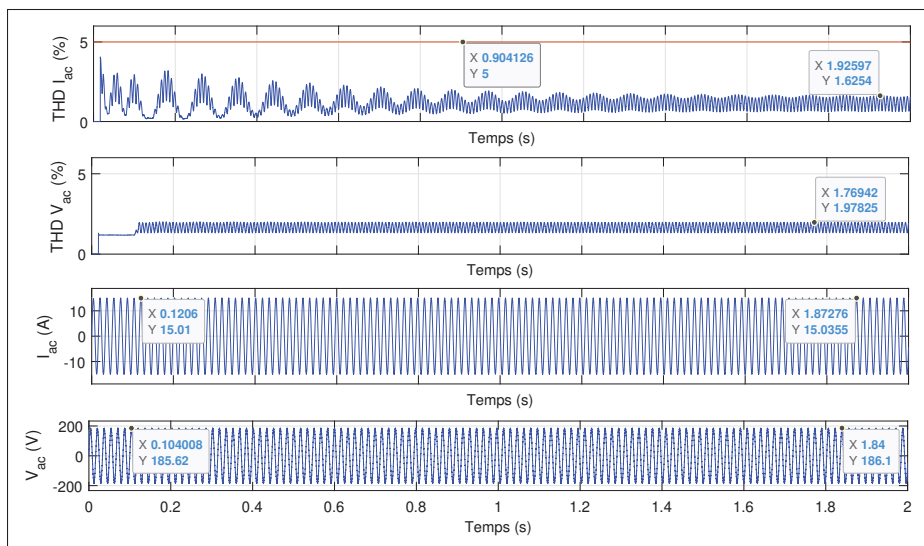


Figure 2.4 Échelon de fréquence de 60Hz à 60.5Hz

inférieur à 2%, et ce même pour une variation significative de sa fréquence. De plus, comme observé à la figure 2.5, le courant injecté dans le réseau demeure en phase avec la tension de celui-ci malgré l'événement. L'onduleur démontre ainsi sa capacité à faire face aux changements de fréquence du réseau.



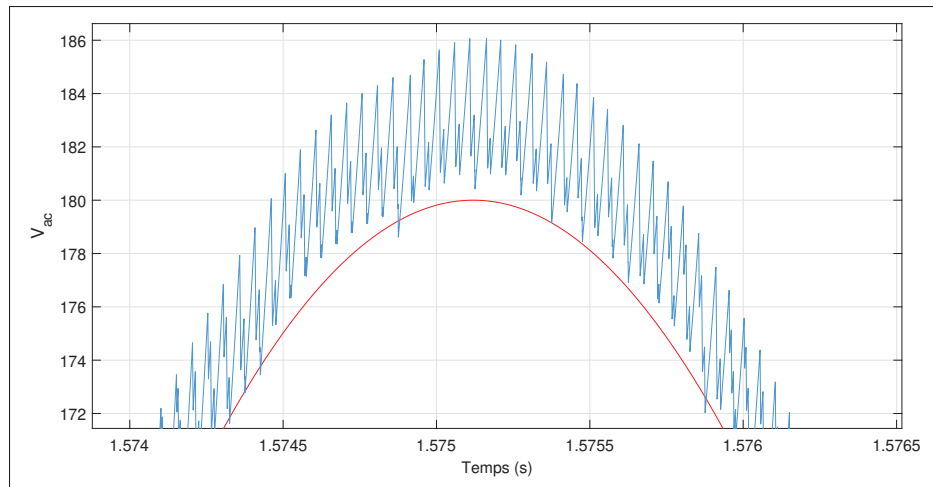


Figure 2.5 Échelon de fréquence de 60Hz à 60.5Hz -  
 Comparaison de la phase de la PLL avec la tension du réseau

## 2.4 Réjection des harmoniques

Le dernier essai qui sera réalisé sur l'onduleur monophasé est de le relier à un réseau pollué d'harmoniques et de valider si la réjection d'harmoniques du contrôle est efficace. Pour y arriver, le courant injecté dans le réseau ne doit pas dépasser 5% de THD. On peut observer les mêmes résultats que les essais précédents aux figures 2.6 à 2.8. Un résumé de l'amplitude des harmoniques ajoutés à l'onde de tension à la fréquence fondamentale est illustré au tableau 2.1. Il est possible d'observer que le THD du courant injecté à la figure 2.6 demeure sous le seuil de 5% tandis que le THD de la tension du réseau est de 12,4%. Cela atteste de la performance de l'onduleur à atténuer les harmoniques et d'injecter un courant non pollué. De plus, à la figure 2.8, il est possible d'observer que le THD du sinus reconstitué avec la phase estimée de la PLL est de l'ordre de 0,2%, ce qui atteste de la performance en réjection d'harmonique du filtre Notch de la PLL. Pour rappel, la fréquence de coupure du filtre Notch était de 50,5 Hz à -3dB tel qu'illustré à la figure 1.3.

Tableau 2.1 Amplitude des harmoniques injectées pour l'essai de réjection d'harmoniques

Rang de l'harmonique	Amplitude (% de la fondamentale)
2	2,00
3	6,00
4	1,50
5	6,00
6	0,75
7	5,00
8	0,60
9	3,50
10	0,60
11	3,50
12	0,50
13	3,00
14	0,50
15	2,00

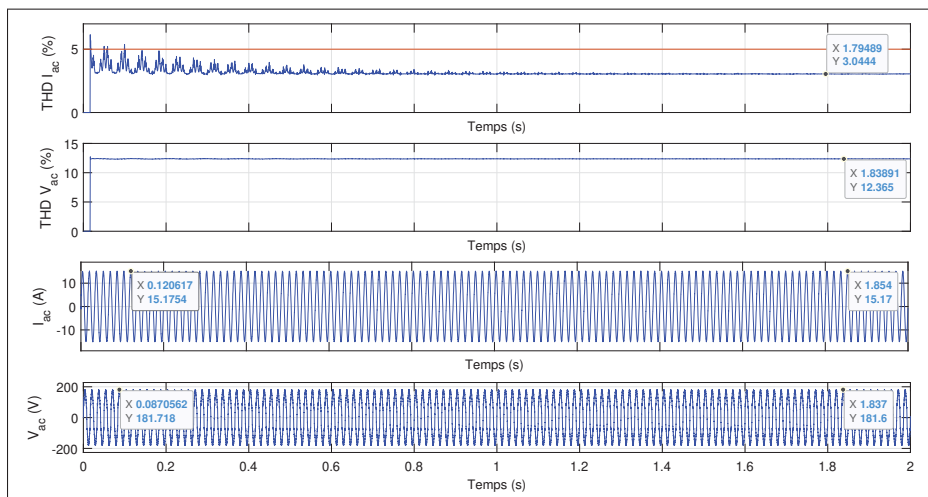


Figure 2.6 Onduleur relié à un réseau pollué - Courant injecté et tension du réseau ainsi que leur THD

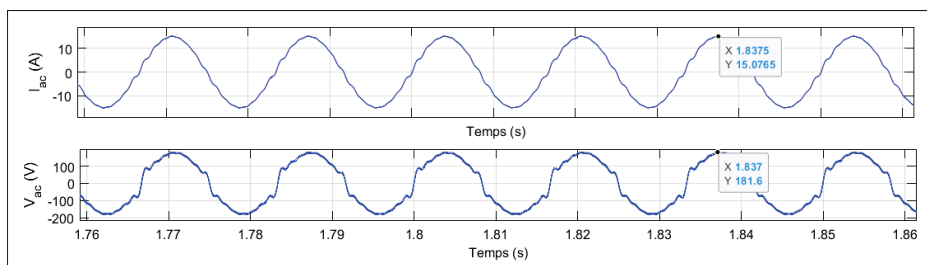


Figure 2.7 Onduleur relié à un réseau pollué - Vue rapprochée sur le courant injecté et la tension du réseau

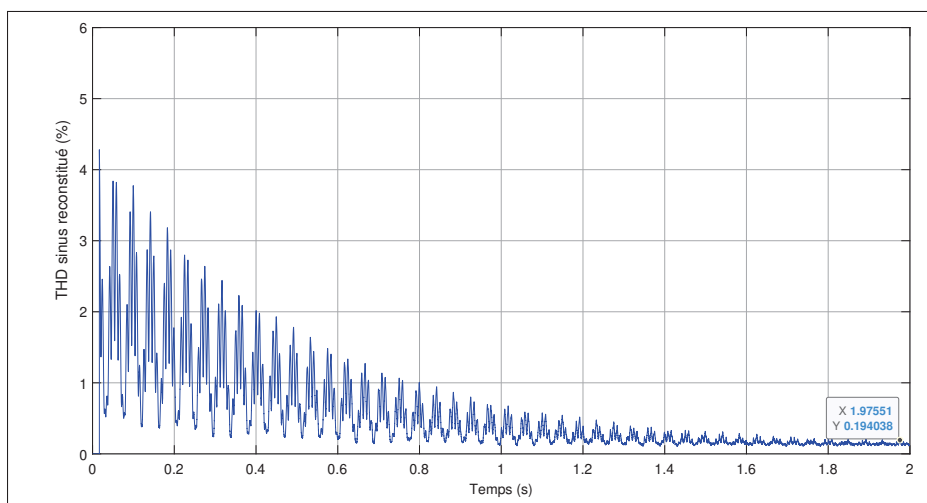


Figure 2.8 Onduleur relié à un réseau pollué - THD du sinus reconstitué avec la phase estimée de la PLL

## 2.5 Conclusion du chapitre 2

L'onduleur monophasé doit être en mesure de fournir des performances acceptables lors de diverses perturbations typiques des présentes sur les réseaux électriques. Le présent chapitre visait à simuler ces différentes perturbations afin de valider la résilience de la conception proposée au chapitre 1. Suite aux différents résultats obtenus dans ce chapitre, il est possible d'affirmer que la performance de l'onduleur répond aux critères établis par les normes de l'industrie, soit le standard IEEE 1547. Maintenant que le modèle de l'onduleur a été validé, il est possible de pousser l'analyse un peu plus loin. En effet, la performance de l'onduleur a été validée pour un point d'interconnexion, où l'impédance du réseau perçue par celui-ci correspondait à une résistance de  $0,2\Omega$  et une inductance de  $1\text{mH}$ . Cependant, l'impédance perçue par l'onduleur n'est pas toujours équivalente à cette combinaison. En effet, l'impédance perçue par celui-ci peut être affectée par sa localisation dans le réseau, en plus de l'état du réseau dans lequel l'onduleur vient se raccorder. Également, l'onduleur possède une résistance  $r_c$  dans son filtre LCL de  $2\Omega$  qui occasionne des pertes pour l'onduleur. Une amélioration intéressante est de tenter de réduire ces pertes en diminuant la valeur de la résistance  $r_c$ . Le prochain chapitre traitera de ces points et certaines modifications seront faites au modèle afin d'en améliorer le rendement, tout en gardant un niveau de résilience acceptable aux perturbations extérieures.

## CHAPITRE 3

### OPTIMISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASÉ

Le modèle de l'onduleur monophasé utilisé jusqu'à présent utilise une résistance d'amortissement ( $r_c$ ) de  $2\Omega$  dans le filtre LCL. Ce filtre est représenté à la figure 3.1. Le comportement de l'onduleur avec celui-ci a été validé pour une impédance Thévenin perçue aux bornes de  $0,2\Omega$  et de  $1\text{mH}$ . Cependant, cette situation ne reflète pas nécessairement la réalité des impédances perçues au point de raccordement de l'onduleur. En effet, l'impédance perçue par celui-ci varie en fonction de la localisation de son point de raccordement ainsi que de l'état du réseau de distribution en amont. Par exemple, si certains transformateurs ou lignes sont indisponibles, l'onduleur risque de percevoir une variation de l'impédance reflétée à ses bornes. Cependant, en dépit de ces conditions variables, celui-ci doit être en mesure d'offrir une performance acceptable pour un large éventail de combinaison d'impédances. La performance de l'onduleur face à un large éventail d'impédance à ses bornes sera évaluée lors de ce chapitre.

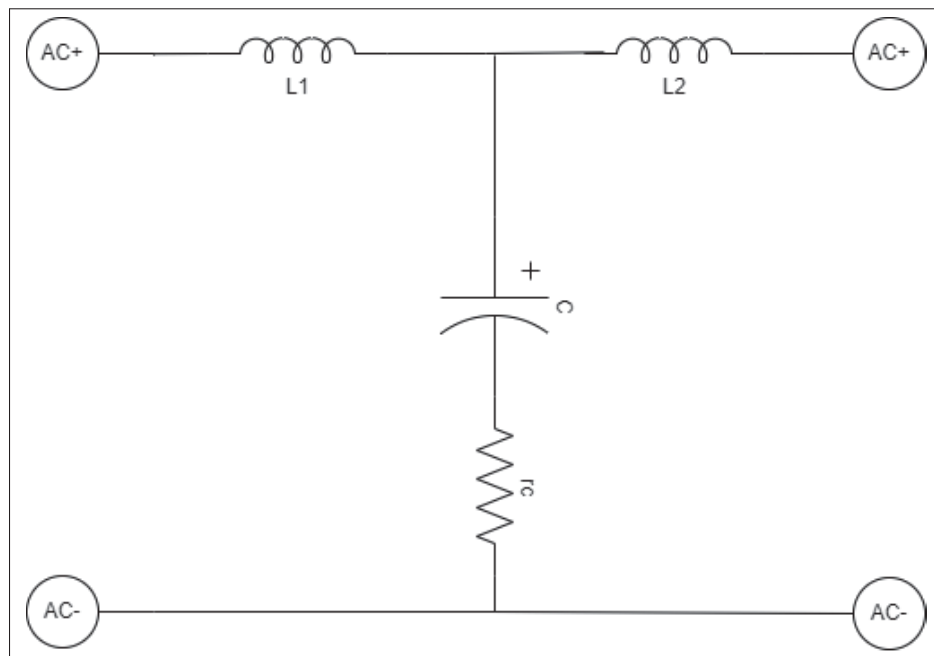


Figure 3.1 Filtre LCL de l'onduleur monophasé

De plus, des optimisations seront appliquées à l'onduleur de ce mémoire. Une des optimisations

intéressantes pour le modèle de l'onduleur est la réduction de la valeur de la résistance  $r_c$ . En effet, cette résistance permet d'atténuer la fréquence de résonance du filtre LCL, mais occasionne des pertes additionnelles au carré du courant circulant dans la branche du filtre ( $I^2R$ ). Une avenue intéressante est d'évaluer si, en modifiant le contrôle de l'onduleur, il serait possible de réduire la valeur de  $r_c$  et ainsi diminuer les pertes. Par contre, en réduisant  $r_c$ , il faut s'assurer que l'onduleur demeure résilient aux perturbations extérieures, comme celles réalisées au chapitre 2. Le changement de la commande s'effectue à partir des gains  $k_p$  et  $k_i$  de la PLL. Les prochaines sections porteront sur un nouveau modèle, avec une résistance  $r_c$  présentant une valeur inférieure et des gains ajustés en conséquence. Une validation du nouveau modèle sera ensuite réalisée. Ensuite, le nouveau modèle sera évalué selon les mêmes critères qu'au chapitre 2, mais pour une multitude de combinaison d'impédances et une variation de la valeur de  $r_c$ . À noter cependant que l'onduleur dans cette section voit sa capacité rehaussée à 10 kVA. Pour ce faire, la nouvelle tension du bus CC est de 400V et l'onduleur peut maintenant atteindre une consigne de 42A. Il est toutefois raccordé sur du 240  $V_{rms}$ . Le choix de conversion à cette nouvelle puissance d'onduleur est pour refléter la nouvelle gamme de capacité des onduleurs monophasés commerciaux qui ont évolué tout au long de ce projet. Le choix de la tension de 400V pour le bus CC est afin de pouvoir synthétiser la tension crête de 340V, représentant 240  $V_{RMS}$ .

### 3.1 Validation du modèle avec une valeur de $r_c$ diminuée

Le modèle de l'onduleur présenté au chapitre 2 possède une résistance dans la branche capacitive du filtre LCL. Elle possède une valeur de  $2\Omega$ . Cette valeur permet d'atténuer plus facilement la fréquence de résonance du filtre LCL au détriment des pertes que cela engendre par une valeur élevée de  $r_c$ . Rappelons que les pertes par effet joules sont directement proportionnelles à la valeur résistive de la branche. Conséquemment, une plus grande résistance entraîne forcément une plus grande valeur de pertes.

Comme mentionné précédemment, une piste d'optimisation sur le rendement de l'onduleur est de réduire la valeur de la résistance  $r_c$ . Cependant, diminuer cette valeur de résistance a pour

effet de réduire l'atténuation de la fréquence de résonance du filtre LCL. Si cette fréquence de résonance n'est pas suffisamment amortie, cela peut mener à l'instabilité du contrôle du courant de l'onduleur. Les composantes harmoniques du courant qui sont à cette de résonance seront amplifiées de façon substantielle dû au grand gain présent à cette fréquence. Ce nouveau courant sera grandement distordu et la PLL ne réussira plus à se synchroniser sur la composante 60 Hz. Il devient donc important d'ajuster les gains de la PLL afin de retrouver une performance acceptable de l'onduleur. La nouvelle valeur de résistance  $r_c$  cible est de  $0,5\Omega$ . Pour réussir à obtenir un comportement dynamique jugé acceptable selon les critères du chapitre 2, une multitude de gains ont fait l'objet de simulations. Le tableau 3.1 présente les gains sélectionnés pour atteindre une performance respectant les critères fixés à la section 2. Afin de vérifier que le

Tableau 3.1 Gain de la PLL,  $r_c = 0,5\Omega$

Paramètres	Valeur
Gain proportionnel $k_p$	0,370
Gain intégral $k_i$	11,3778

système de contrôle fonctionne adéquatement, on peut observer à l'annexe I les courbes des résultats obtenus en effectuant les simulations du modèle, comme présenté au chapitre 2 avec la conception d'origine avant optimisation. Ceux-ci sont présentés à l'annexe I afin d'éviter d'alourdir les observations de ce chapitre.

### 3.2 Ajout du mode de régulation tension-puissance réactive

Comme il a été mentionné précédemment, les onduleurs se raccordent au réseau à un point communément noté PCC, ou *Point of Common Coupling*. Toutefois, il est requis dans les normes que les onduleurs possèdent un ou plusieurs modes de contrôle. Ces modes de contrôles diffèrent entre eux sur la variable que le système tentera de contrôler au PCC. Certains modes de contrôle communément utilisés ont pour objectifs d'aider à contrôler la tension au point d'interconnexion ou d'injecter seulement de la puissance active à ce point. Jusqu'à présent, l'onduleur présenté

dans ce mémoire tente d'injecter sa consigne en puissance active en tout temps, peu importe les conditions externes, telle que la tension au PCC. Il est donc réglé pour fournir de la puissance active et ne contribue pas au support de tension pour le réseau. Il sera intéressant de modéliser un deuxième mode de contrôle, soit le mode de contrôle tension-puissance réactive. Ce mode permet d'injecter de la puissance réactive (hors phase de  $90^\circ$ ) en diminuant la composante active du courant afin d'aider à réguler la tension au PCC. Le mode de contrôle implémenté dans ce travail est basé sur les directives de IEE (2018) et est illustré sur la figure 3.2. Comme il est

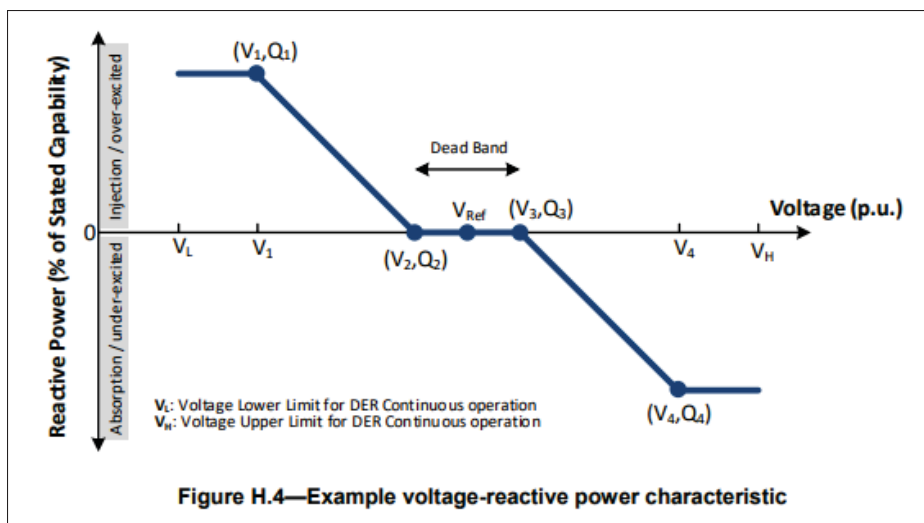


Figure 3.2 Caractéristique tension-puissance réactive des onduleurs en mode tension-puissance réactive  
Tirée de IEE (2018)

représenté sur la figure 3.2, il y a des tensions auxquelles la puissance réactive est plafonnée à un certain pourcentage de la capacité de l'onduleur. Il y a également une bande-morte où l'onduleur n'injecte pas de puissance réactive. Ces deux zones sont ensuite reliées entre-elles avec une pente définie par les tensions  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  et  $V_4$ . Ces tensions sont définies pour les onduleurs de type A et B dans le tableau 3.3 tiré de la IEEE 1547, 2018. L'onduleur de ce mémoire est de type B. Ceci signifie qu'il possède la plus grosse contribution demandée dans ce type de contrôle. Le code Matlab utilisé afin de modéliser le contrôle tension-puissance réactive est fourni en annexe II de ce mémoire.



**Table 8—Voltage-reactive power settings for normal operating performance  
Category A and Category B DER**

Voltage-reactive power parameters	Default settings		Ranges of allowable settings	
	Category A	Category B	Minimum	Maximum
$V_{Ref}$	$V_N$	$V_N$	$0.95 V_N$	$1.05 V_N$
$V_2$	$V_N$	$V_{Ref} - 0.02 V_N$	Category A: $V_{Ref}$ Category B: $V_{Ref} - 0.03 V_N$	$V_{Ref}^c$
$Q_2$	0	0	100% of nameplate reactive power capability, absorption	100% of nameplate reactive power capability, injection
$V_3$	$V_N$	$V_{Ref} + 0.02 V_N$	$V_{Ref}^c$	Category A: $V_{Ref}$ Category B: $V_{Ref} + 0.03 V_N$
$Q_3$	0	0	100% of nameplate reactive power capability, absorption	100% of nameplate reactive power capability, injection
$V_1$	$0.9 V_N$	$V_{Ref} - 0.08 V_N$	$V_{Ref} - 0.18 V_N$	$V_2 - 0.02 V_N^c$
$Q_1^a$	25% of nameplate apparent power rating, injection	44% of nameplate apparent power rating, injection	0	100% of nameplate reactive power capability, injection <sup>b</sup>
$V_4$	$1.1 V_N$	$V_{Ref} + 0.08 V_N$	$V_3 + 0.02 V_N^c$	$V_{Ref} + 0.18 V_N$
$Q_4$	25% of nameplate apparent power rating, absorption	44% of nameplate apparent power rating, absorption	100% of nameplate reactive power capability, absorption	0
Open loop response time	10 s	5 s	1 s	90 s

<sup>a</sup>The DER reactive power capability may be reduced at lower voltage.  
<sup>b</sup>If needed DER may reduce active power output to meet this requirement.  
<sup>c</sup>Improper selection of these values may cause system instability.

Figure 3.3 Établissement des valeurs de tension et puissance réactive - mode de contrôle tension-puissance réactive  
Tirée de IEE (2018)

### 3.3 Performance de l'onduleur en présence d'impédances variables

Comme mentionné en conclusion du chapitre 2, le contrôle de l'onduleur a été validé pour une impédance précise, soit une impédance Thévenin d'un réseau typique au point de raccordement de  $0.2\Omega$  et  $1mH$ . Cependant, l'impédance Thévenin du réseau perçu par l'onduleur peut être très variable et dépend à la fois de l'emplacement géographique du point de raccordement sur le réseau et de son état ponctuel. L'impédance perçue par l'onduleur sera petite si le réseau auquel il est relié est considéré fort (grand SCR). De manière complémentaire, elle sera

grande si le réseau est considéré comme faible (petit SCR). Les termes forts et faibles sont utilisés dans ce contexte pour décrire la sensibilité en tension aux différentes perturbations sur le réseau. Le terme perturbations ici peut représenter tout événement venant changer le point d'équilibre du réseau, comme une variation de puissance active ou réactive injectée au PCC, une contingence sur le réseau en amont, etc. Si une perturbation entraîne une forte variation de tension, le réseau est dit faible. Le même principe s'applique pour ce qui est du réseau fort, où la même perturbation aura peu d'impact sur la tension. Comme discuté dans O.Tremblay, D.Rimorov, J.-F.Haché, D.Guérette & R.Gagnon (2022), une impédance typique perçue par l'onduleur dans un raccordement résidentiel monophasé est de 2,4mH et  $0,8\Omega$  pour un réseau fort et 4,4mH et  $1,4\Omega$  pour un réseau faible. Ces valeurs sont basées sur un onduleur d'une capacité de 5 kVA opérant à 2 kVA, ce qui est environ la moitié de la capacité de l'onduleur de ce mémoire et 20% si on considère la puissance d'opération de 2kVA. L'onduleur opérant à 10kVA aura pour effet d'obtenir un réseau encore plus faible en utilisant les mêmes impédances, car le SCR par définition est le ratio de la puissance apparente de court-circuit au POI divisé par la puissance apparente de l'onduleur NERC (2018). Le SCR équivalent est donc de 2,5, ce qui est considéré comme un réseau faible. En se basant sur ces valeurs, il est pertinent d'évaluer la performance de l'onduleur à différentes impédances au PCC afin d'évaluer la pertinence des gains établis précédemment pour de multiples situations de réseau.

On peut observer sur les figures 3.4 à 3.9 les résultats de simulations pour des valeurs de résistances  $r_c$  de 0,3 à 0,5  $\Omega$ . Les cercles bleus sur la figure signifient que pour la combinaison  $r_g$  et  $L_g$ , le courant injecté possède un THD inférieur à 5% tandis que les croix rouges indiquent un THD supérieur à 5%. Les combinaisons de résistances et réactances sont indiquées par les deux axes de la figure. L'encadré bleu réfère quant à lui à la zone où il y a au moins une combinaison d'impédance qui permet une opération respectant les exigences de raccordement.

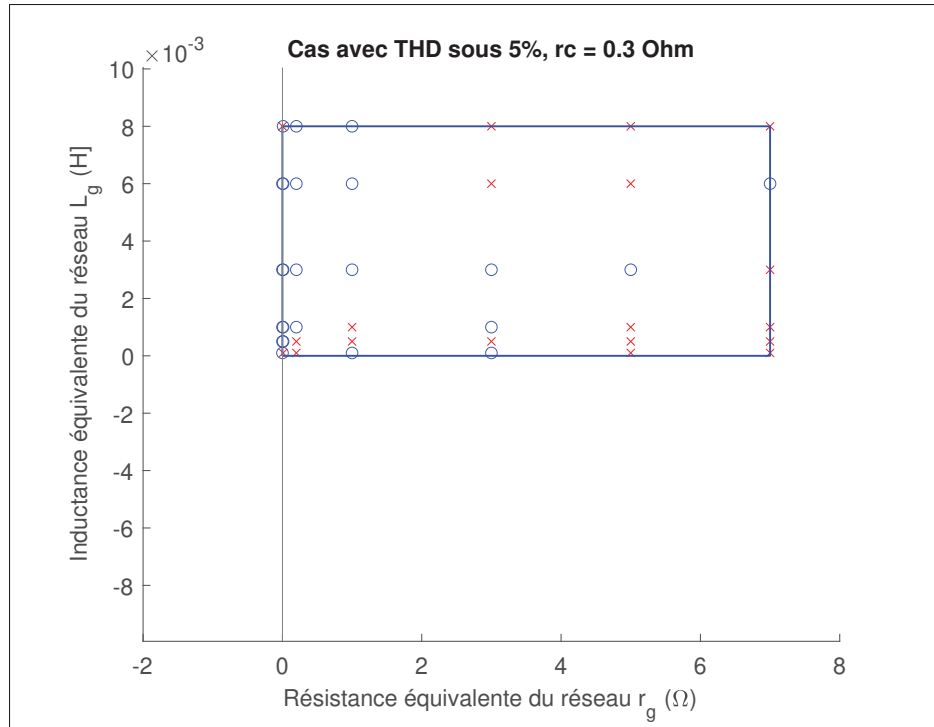


Figure 3.4 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,3 \text{ } \Omega$

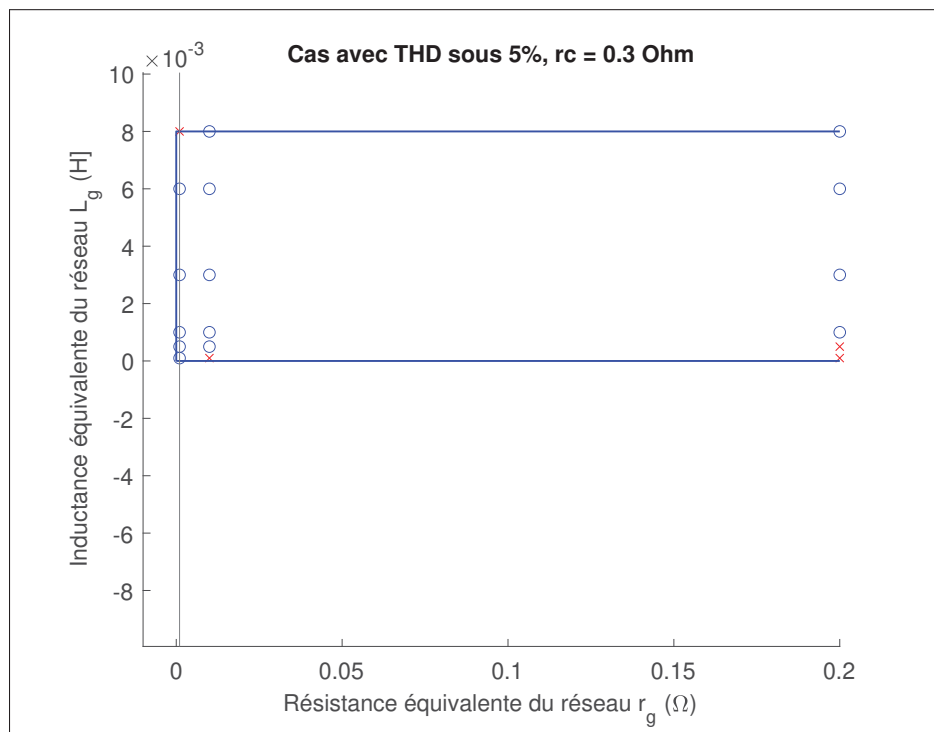


Figure 3.5 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,3 \text{ } \Omega$  - Vue rapprochée

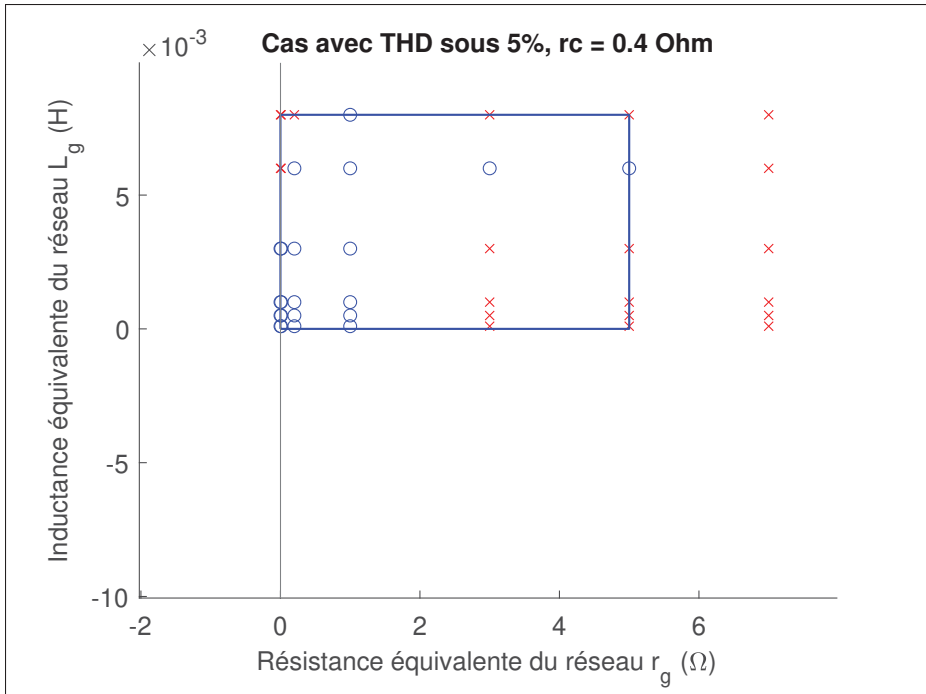


Figure 3.6 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,4 \Omega$

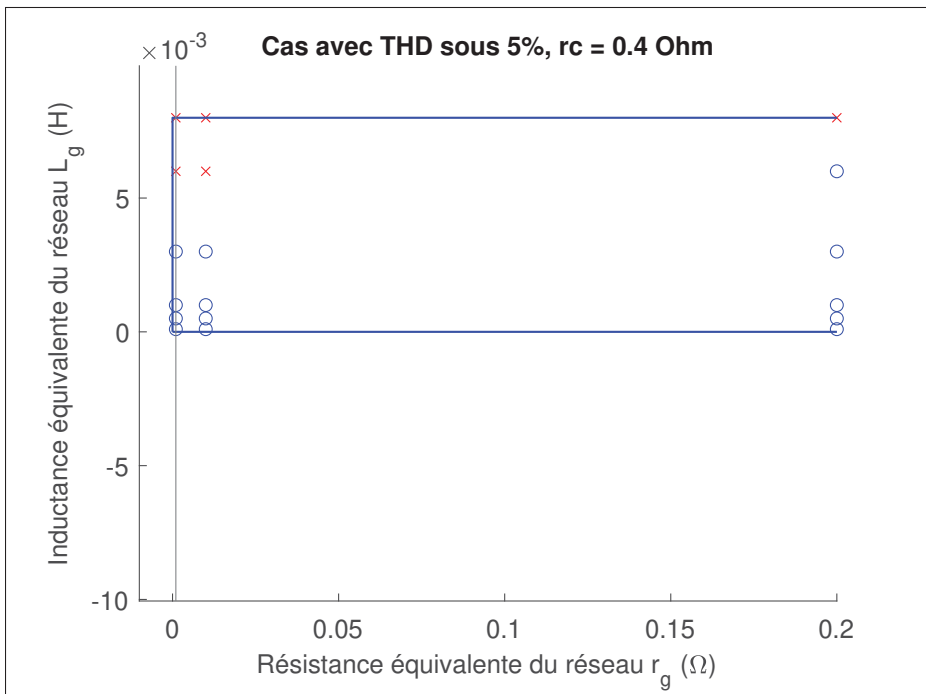


Figure 3.7 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,4 \Omega$  - Vue rapprochée

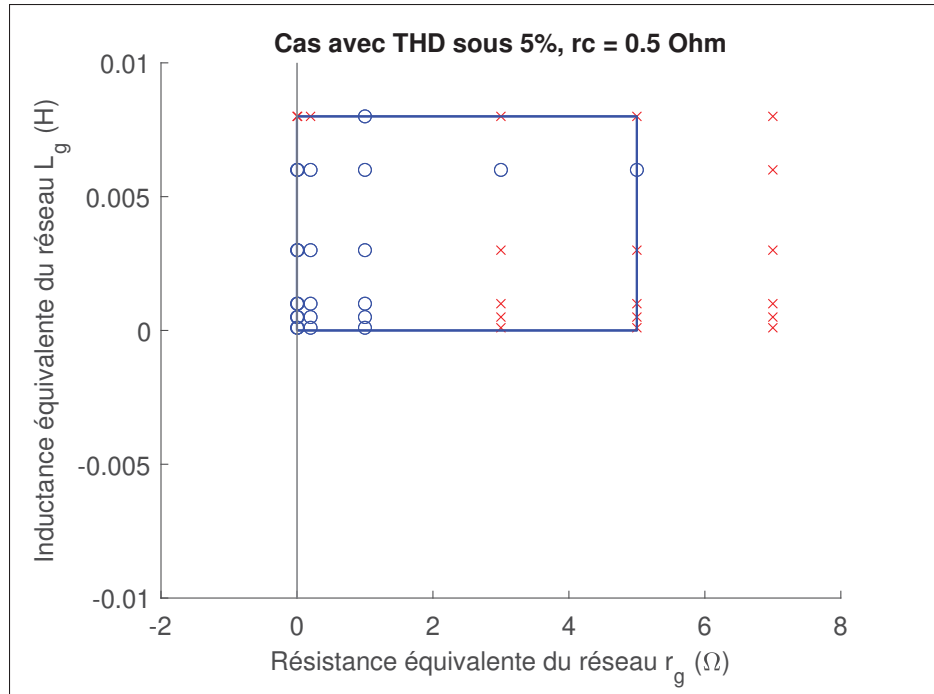


Figure 3.8 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,5 \text{ } \Omega$

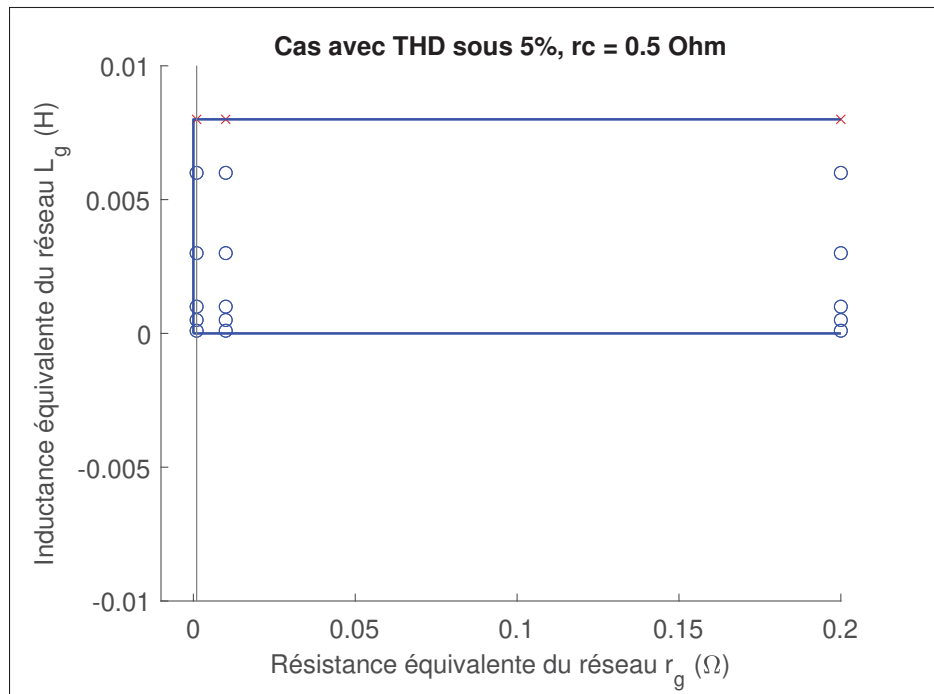


Figure 3.9 Combinaisons de  $L_g$  et  $r_g$  pour une valeur de  $r_c$  de  $0,5 \text{ } \Omega$  - Vue rapprochée

Il est possible de constater en observant les trois figures que plus la résistance  $r_c$  est grande, plus la gamme de combinaison de résistances et réactances du réseau où la limite de THD du courant sera respectée est large. Cela respecte la théorie selon laquelle la fréquence de résonance (à laquelle le filtre LCL possède un gain élevé) est atténuée, ce qui se traduit par une quantité d'harmoniques plus faible dans le courant injecté. Par contre, il est possible de remarquer que la résistance  $r_c$  de  $0,5\Omega$  possède le plus grand nombre de combinaisons  $r_g$  et  $L_g$  avec un THD inférieur à 5%. Aussi, les résultats pour le couple de données ( $7\Omega, 6\text{mH}$ ) avec un  $r_c$  de  $0,3\Omega$  ne sont pas concluants. Cette instabilité peut être causée autant par le modèle que par une instabilité réelle liée au point de fonctionnement.

### 3.4 Conclusion du chapitre 3

En se basant sur les résultats du chapitre 3, il est possible de conclure que l'onduleur présenté au chapitre 2 est amélioré avec une réduction de ses pertes en imposant une réduction de la valeur de la résistance  $r_c$ . La valeur de la résistance  $r_c$  est fixée à  $0,5\Omega$  afin de réduire significativement les pertes par rapport à une valeur de  $2\Omega$ , sans toutefois réduire de façon trop importante la gamme d'impédances respectant les critères de THD de 5% en ce qui a trait au courant injecté. La valeur de  $0,5\Omega$  sera utilisée dorénavant dans les simulations. Cette valeur de résistance a été choisie comme compromis entre la réduction des pertes et la stabilité de l'onduleur lors des différents essais réalisés dans ce chapitre. Cependant, un point crucial n'a pas encore été discuté : l'impact de raccorder plusieurs onduleurs au même POI. Cette situation n'est pas rare, voire encore plus fréquente pour des onduleurs raccordés sur le même transformateur du réseau de distribution aux endroits où l'autoproduction est plus rentable. Le fait d'avoir plusieurs onduleurs raccordés au même PCC vient augmenter la problématique de raccorder des sources d'énergie à base d'onduleurs en réseau faible NERC (2017). Plusieurs métriques telles que le WSCR tentent de tenir compte de cette réalité, étant donné que le SCR est jugé trop optimiste comme moyen d'évaluer si le raccordement fera face à des enjeux potentiels. Ces indicateurs sont typiquement utilisés au niveau de la haute tension, mais demeurent valides dans leur essence. Bref, une plus grande vigilance doit être mise de

l'avant lorsqu'on raccorde plusieurs onduleurs au même POI. Le prochain chapitre abordera cet aspect en analysant l'impact de la présence de plus d'un onduleur au même POI et des mesures à prendre au niveau du contrôle afin de s'assurer d'obtenir un comportement dynamique acceptable.

De plus, l'ajout d'un nouveau mode de contrôle de régulation de la tension à son POI permet maintenant à l'onduleur de fournir des services de régulation de tension au réseau. Ce nouveau mode de contrôle permet de représenter plus fidèlement la gestion du courant du convertisseur afin de respecter les exigences de raccordement recommandées dans IEE (2018). Ce mode de contrôle sera un élément vital au bon fonctionnement du raccordement de plusieurs onduleurs au même POI.





## CHAPITRE 4

### BRANCHEMENT DE PLUSIEURS ONDULEURS AU MÊME POINT DE RACCORDEMENT

Comme mentionné à la fin du chapitre 3, il est très probable que plus d'un onduleur soit branché au même point de raccordement ou sur le même transformateur de distribution. Effectivement, plusieurs domiciles sont normalement alimentés par un même transformateur de distribution. Parmi ces domiciles, plusieurs onduleurs peuvent cohabiter sur le même point de raccordement, tout en n'ayant aucune garantie d'être du même modèle, de la même génération et avoir la même stratégie de contrôle. De plus, ces onduleurs ne sont pas munis de télécommunications, ce qui rend leur fonctionnement indépendant l'un de l'autre sans échanges d'information possibles. C'est pourquoi la IEEE 1547-2018 est précieuse en établissant un standard à respecter pour encadrer les performances des onduleurs de divers fournisseurs. Toutefois, il demeure possible d'observer certaines problématiques si le contrôle des onduleurs n'est pas coordonné. La prochaine section abordera ces points, en démontrant certaines problématiques ainsi qu'en proposant des moyens de mitigations.

#### 4.1 Modélisation de plusieurs onduleurs au même point de raccordement

Comme décrit précédemment, il est possible que plusieurs onduleurs puissent se retrouver sur le même point de raccordement. Le modèle de l'onduleur et son contrôle, utilisé pour l'analyse présentée dans ce chapitre, est celui du chapitre 3. Cependant, le deuxième onduleur se connecte au réseau avec une pente de  $45\text{A/s}$ , débutant lorsque le premier onduleur atteint sa valeur en régime permanent. Le choix de la rampe provient du fait que l'on désire atteindre une valeur en régime permanent dans un délai rapide. De plus, ce deuxième onduleur possède une consigne en régime permanent de  $42\text{ A}$  afin d'obtenir une puissance apparente de  $10\text{ kVA}$  à  $240\text{ VRMS}$ , représentant la capacité nominale de l'onduleur. Les deux onduleurs possèdent l'approche de régulation Volt/Var décrite au chapitre 3. Le schéma bloc des onduleurs peut être observé à la figure 4.1. Les paramètres du transformateur de distribution sont présentés à la figure 4.2. Les valeurs des impédances représentant le câblage résidentiel ainsi que l'impédance du réseau et de

la ligne de distribution, ramenés au secondaire du transformateur de distribution, sont présentées au tableau 4.1. Ces valeurs d'impédances proviennent de l'article O.Tremblay *et al.* (2022).

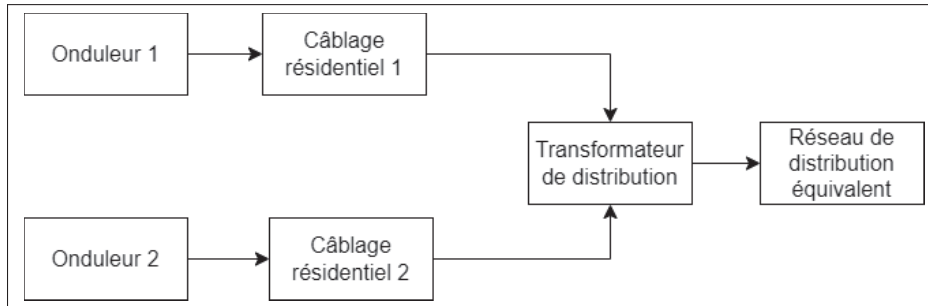


Figure 4.1 Schéma bloc de deux onduleurs raccordés au même transformateur de distribution

Tableau 4.1 Impédances équivalentes

Équipement	Résistance	Réactance	Capacitance
Câblage résidentiel, réseau fort	15 mΩ	50 μH	s.o.
Câblage résidentiel, réseau faible	15 mΩ	50 μH	s.o.
Ligne de distribution, réseau fort	0,1 Ω	835 μH	2,979 μF
Ligne de distribution, réseau faible	0,1 Ω	835 μH	2,979 μF
Impédance du réseau, réseau fort	0,61Ω	1,4mH	s.o.
Impédance du réseau, réseau faible	1,21Ω	3,4mH	s.o.

Block Parameters: Linear Transformer 75 kVA 14,400-120-120 V

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:

Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:

Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]:

Measurements

OK Cancel Help Apply

Figure 4.2 Paramètres du transformateur de distribution

## 4.2 Validation du branchement de plusieurs onduleurs au même point de raccordement

Afin de valider la possibilité de raccorder deux onduleurs monophasés au même point d'interconnexion, une première simulation vise à vérifier que ceux-ci sont en mesure d'opérer en régime permanent, à leurs consignes respectives, tout en présentant un THD de courant inférieur à 5%. Une hypothèse importante à considérer est que les onduleurs possèdent la source d'énergie nécessaire afin de pouvoir injecter leur puissance nominale au réseau, ce qui représente un cas pessimiste. En effet, plus la puissance injectée sur le réseau est grande, plus importante sera la perturbation engendrée. Donc, le fait d'avoir deux onduleurs à leur capacité maximale injectant au même point représente alors le cas le plus contraignant sur le réseau. Il est possible de constater aux figures 4.3 à 4.6 le comportement des deux onduleurs raccordé à un réseau fort. Rappelons qu'un réseau fort peut être décrit comme une petite impédance perçue par l'onduleur, entraînant une faible variation de tension pour une faible variation du courant injecté. À la figure 4.3, il est possible d'observer que la rampe de courant du premier onduleur s'effectue sans embûche en atteignant sa valeur en régime permanent de 42A. La forme d'onde du courant est aussi dénuée d'harmonique, tel qu'illustré par le THD du courant injecté à la figure 4.4. Cependant, il est possible de constater qu'au temps  $t = 1,25$  seconde, la consigne des deux onduleurs pour le terme  $I_p$  devient nulle, représentant une consigne de puissance active nulle. Cette consigne nulle signifie que l'onduleur n'injecte plus de puissance active sur le réseau. Ceci est expliqué par le fait que la tension du réseau dépasse la valeur limite préétablie de 264 V (1,1x240V) avec environ 271V sur la figure 4.6. La machine à état bascule alors en mode de cessation de production des onduleurs en ayant une consigne de courant nulle, car la tension est trop élevée. Cette consigne de la machine à état des deux onduleurs est aussi représentée à la figure 4.5 où les courants actif et réactif sont représentés par les courants  $I_p$  et  $I_q$  respectivement. Cette contribution est donc conforme aux critères de la figure 3.2 qui est dépendante de la tension aux bornes de l'onduleur pour le contrôle Volt/Var. Finalement, la tension aux bornes de l'onduleur est illustrée à la figure 4.6 ainsi que l'état de la machine à état modélisant le contrôle Volt/Var des deux onduleurs. L'état de la machine à état correspond bien à l'état attendu avec le blocage des onduleurs dans une situation où la tension du réseau est trop élevée. Il est aussi

possible de constater aux figures 4.3 à 4.6 que l'onduleur reprend son injection de puissance active  $I_p$  au temps  $t = 2,5$  secondes, ce qui fait remonter la tension à un niveau non acceptable. Cette situation peut être expliquée par le fait que les deux onduleurs ajustent leurs machines à état de façon simultanée. En effet, suite au blocage des deux onduleurs, la tension diminue à la valeur nominale de 240V, tension qui serait observable si les deux onduleurs n'étaient pas présents. Ensuite, chacun d'eux mesure une tension selon les réglages qui leur permettent d'injecter tout leur courant en puissance active et sans contribution en courant réactif. Cela entraîne une hausse substantielle de la tension qui aurait pu être évitée si les deux réglages étaient décalés.

Une autre alternative pour éviter cette situation problématique est que l'un d'eux injecte de la puissance réactive pour aider à maintenir la tension à un niveau acceptable. On peut constater l'effet pour le même réseau si la mise à jour de l'état des machines à états est décalée de 0,10 seconde aux figures 4.7 à 4.10. En effet, un petit décalage de 0,1 seconde permet aux deux onduleurs de ne pas surcompenser. De plus, on peut constater que l'onduleur 2 se stabilise à l'état 5 sur la figure 4.10, ce qui permet d'injecter du courant réactif afin de contribuer au maintien de la tension dans les limites établies ( $\pm 10\%$  de  $240 V_{RMS}$ ) tout en continuant d'injecter du courant actif. Les deux onduleurs sont donc en mesure avec une mise à jour de leur contrôle décalé d'injecter dans le même réseau, ce qui auparavant n'était pas possible avec un contrôle mis à jour de façon simultané.

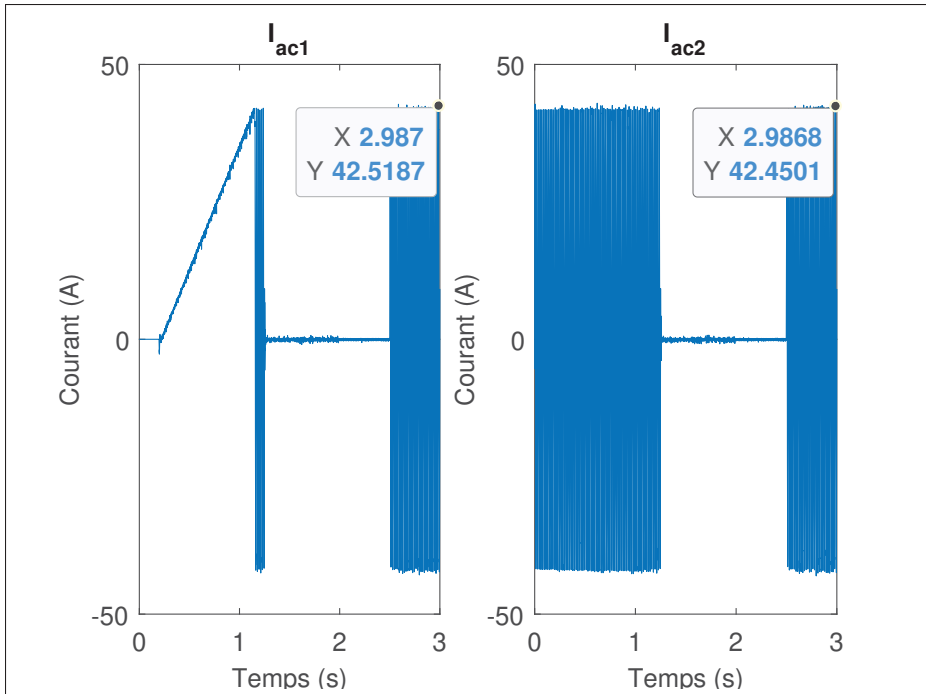


Figure 4.3 Courant injecté des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané

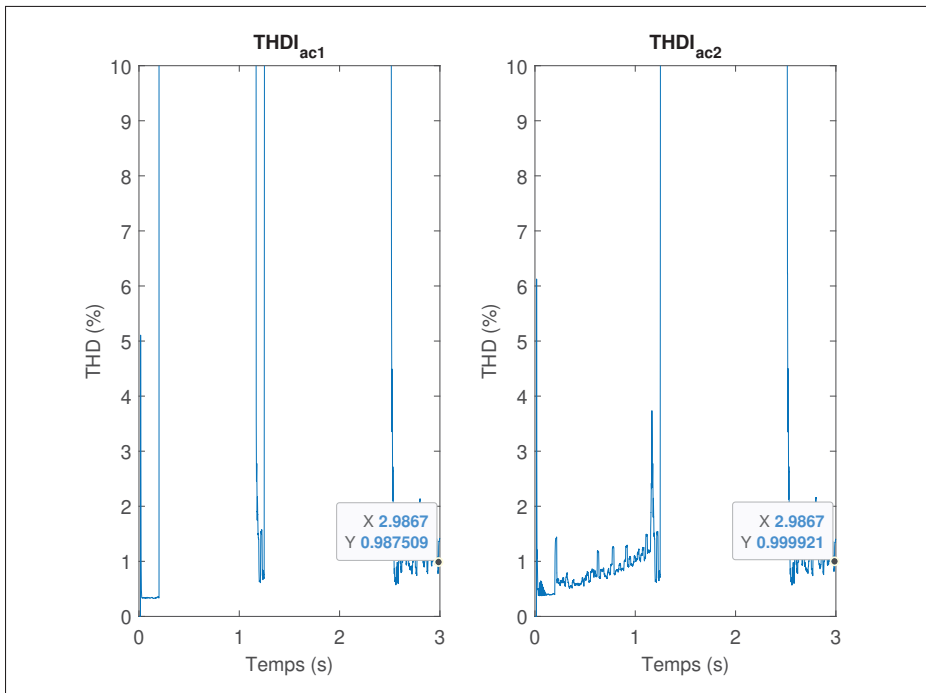


Figure 4.4 THD du courant injecté des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané

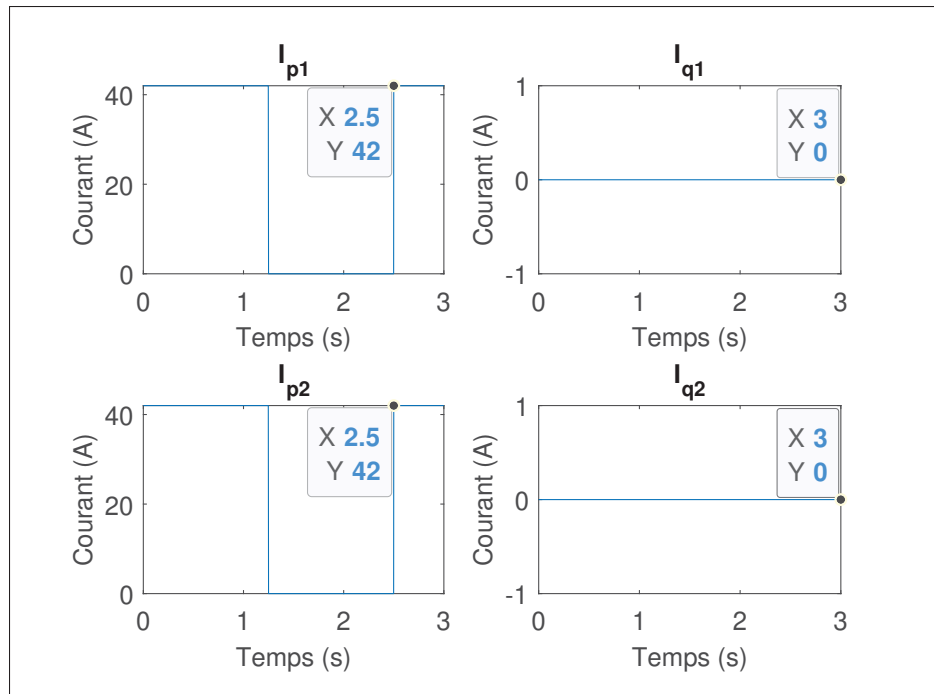


Figure 4.5 Consignes de la machine à état pour le courant  $I_p$  et  $I_q$  des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané

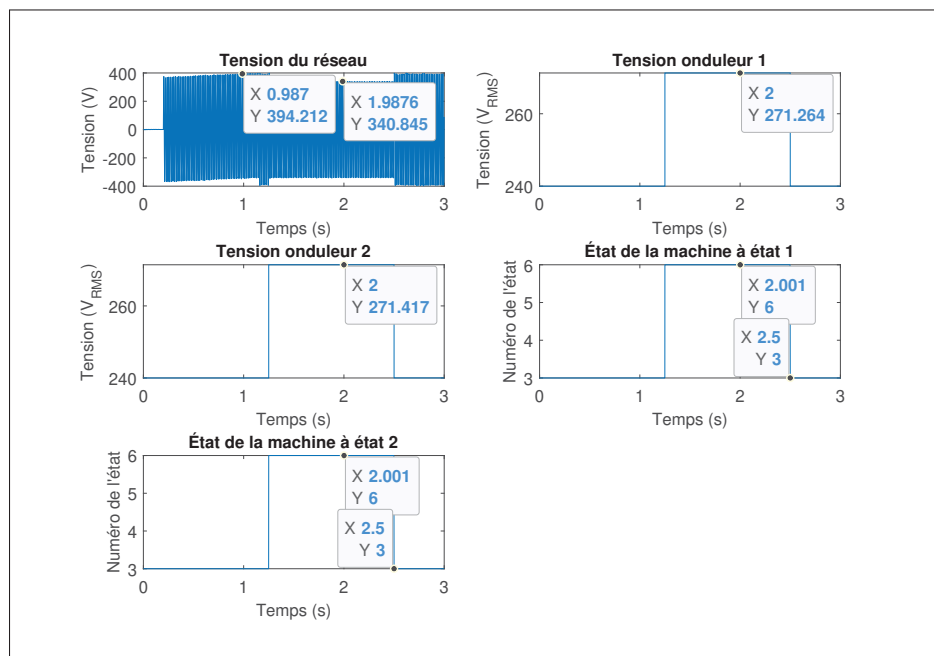


Figure 4.6 Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle simultané

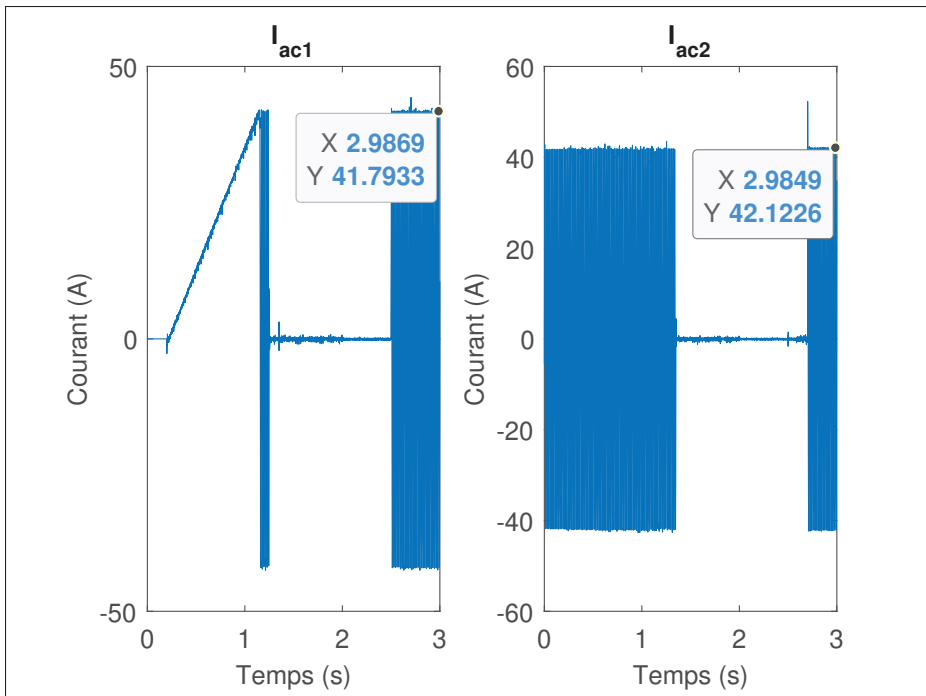


Figure 4.7 Courant injecté des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé

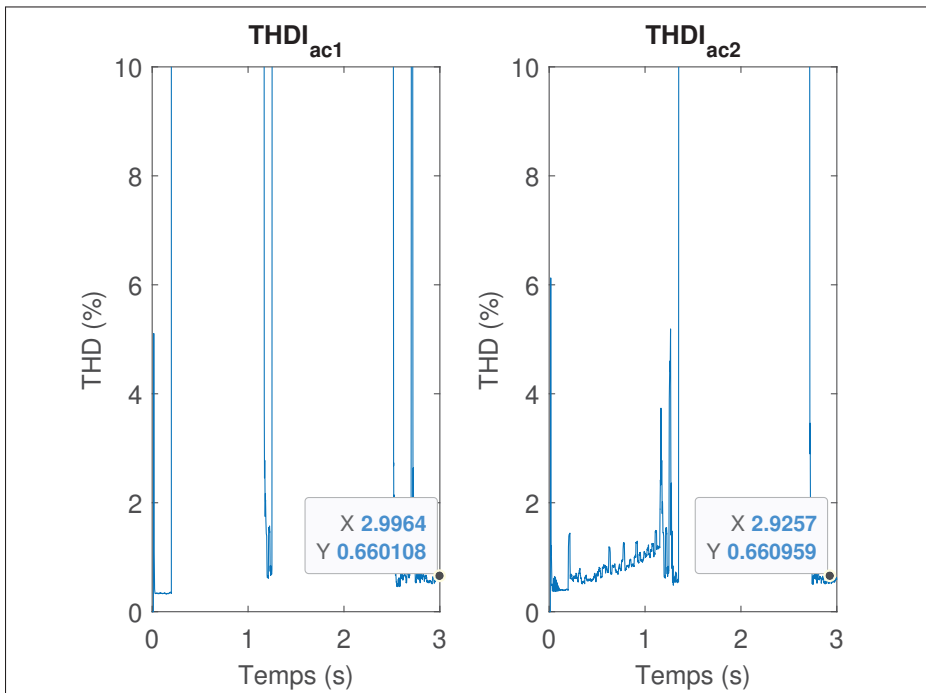


Figure 4.8 THD du courant injecté des 2 onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé



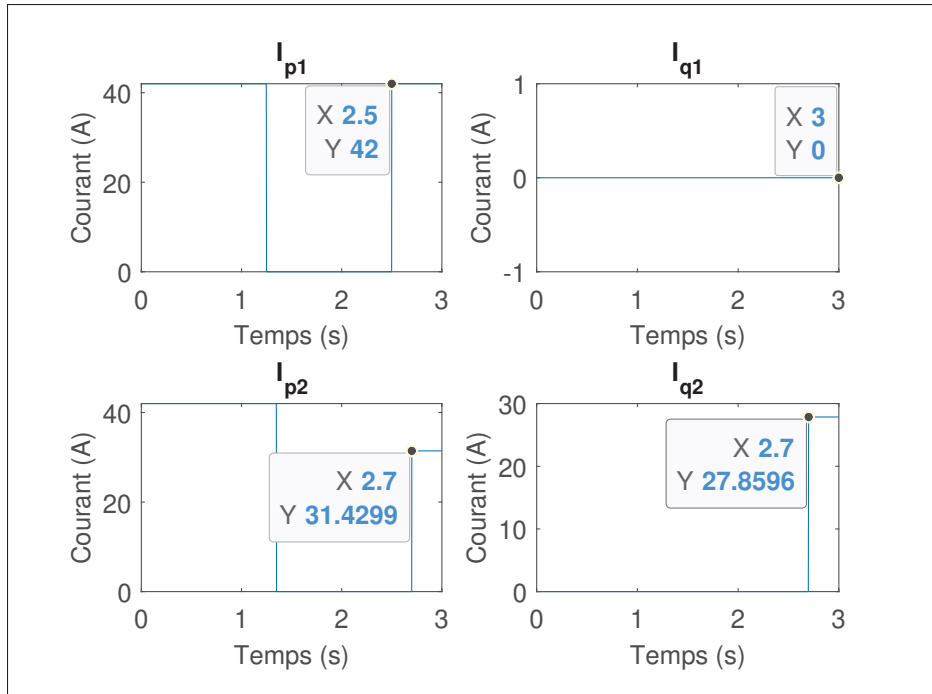


Figure 4.9 Consignes de la machine à état pour le courant  $I_p$  et  $I_q$  des 2 onduleurs dans un réseau fort, contrôle décalé

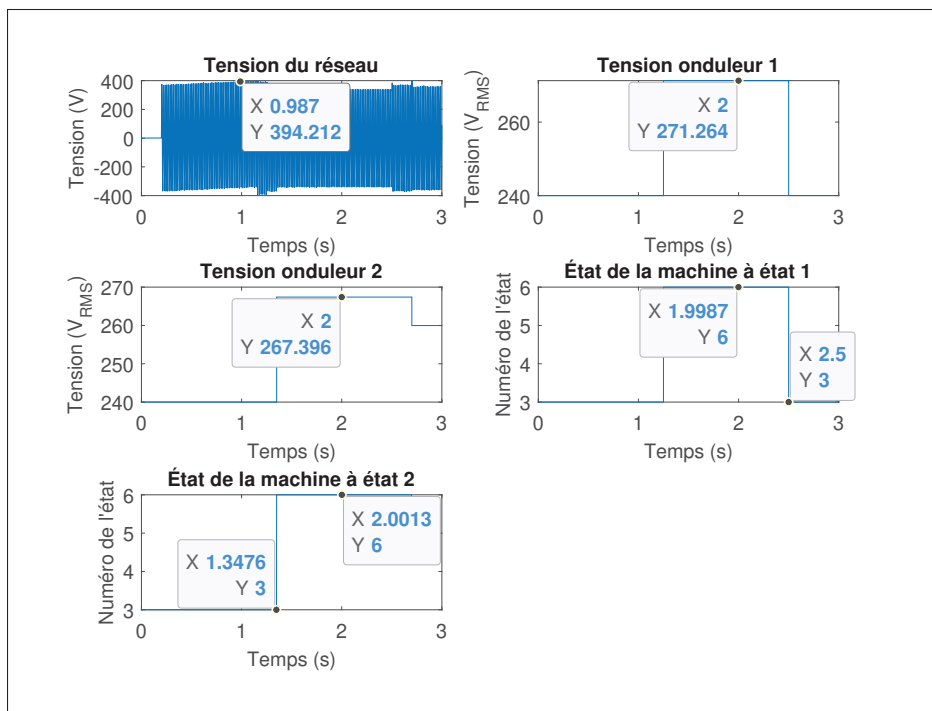


Figure 4.10 Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs dans un réseau fort avec un contrôle décalé

En ce qui concerne un réseau faible, on remarque aux figures 4.11 à 4.14 que la tension et le THD du courant sont erratiques, voire hors de contrôle pour une mise à jour du contrôle des deux onduleurs simultanés. Ce phénomène découle du fait que les contrôles Volt/Var des deux onduleurs sont synchronisés. En étant synchronisés, les deux onduleurs font leurs actions correctives au même instant, ce qui occasionne une surcompensation, entraînant des surtensions ou des sous tensions au point d'interconnexion. Ce résultat est d'autant plus amplifié par la faiblesse du réseau où on observe des variations de tension importantes pour une variation du courant injecté. Heureusement, cette problématique peut être facilement réglée en retardant aussi l'action du contrôle Volt/Var de l'un des deux onduleurs, tel qu'illustré aux figures 4.15 à 4.18 représentant encore un réseau faible, mais avec un décalage dans le contrôle Volt/Var du deuxième onduleur. Le premier onduleur fait sa mise à jour à  $t = 1,3$  seconde tandis que le deuxième onduleur se met à jour à  $t = 1$ s. Il est possible d'observer que cela prend quelques secondes avant de se stabiliser, mais les deux onduleurs atteignent le régime permanent dans une opération stable au temps  $t = 4$ s. Le deuxième onduleur se met à injecter du courant réactif afin de faire revenir la tension à un niveau acceptable, ce qui permet aux 2 onduleurs de rester en service. On peut aussi observer à la figure 4.16 qu'au temps  $t = 4$ s et plus, le THD des deux courants injectés redevient sous le seuil limite de 5%. Les contrôles des deux onduleurs se comportent comme prévu comme illustré à la figure 4.18 où les onduleurs changent leurs consignes ou bloquent selon la tension à leurs bornes.

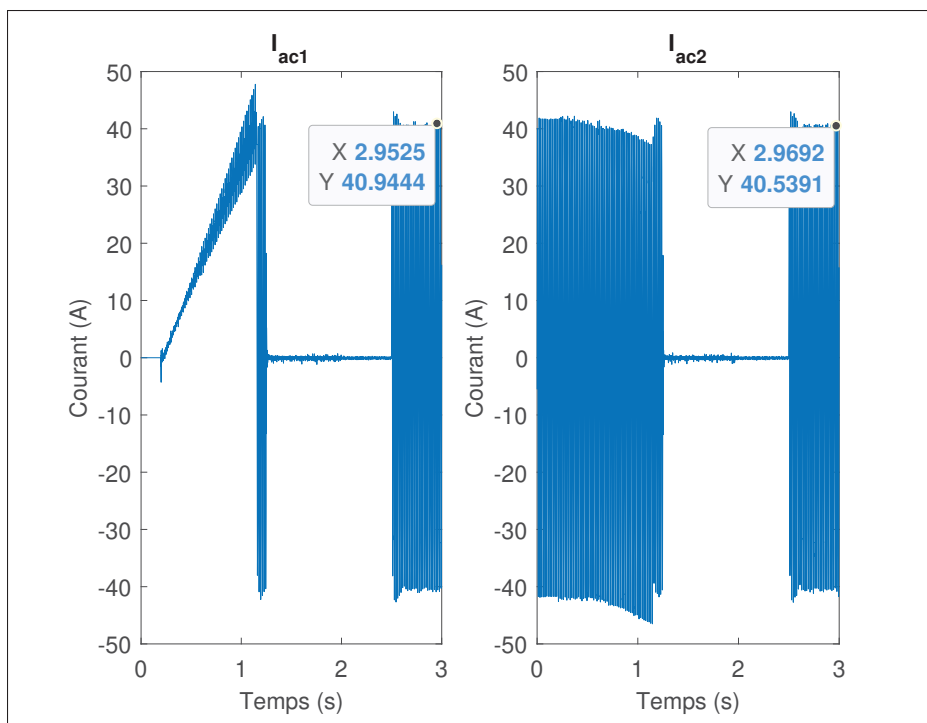


Figure 4.11 Courant injecté dans le réseau des 2 onduleurs en présence d'un réseau faible pour un contrôle simultané

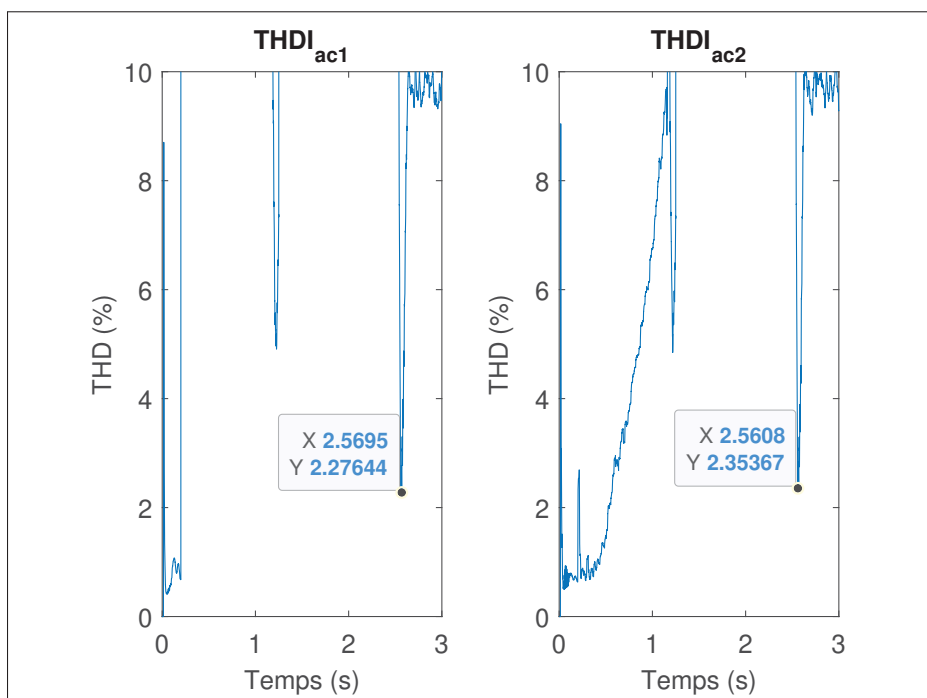


Figure 4.12 THD du courant injecté dans le réseau pour les 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané

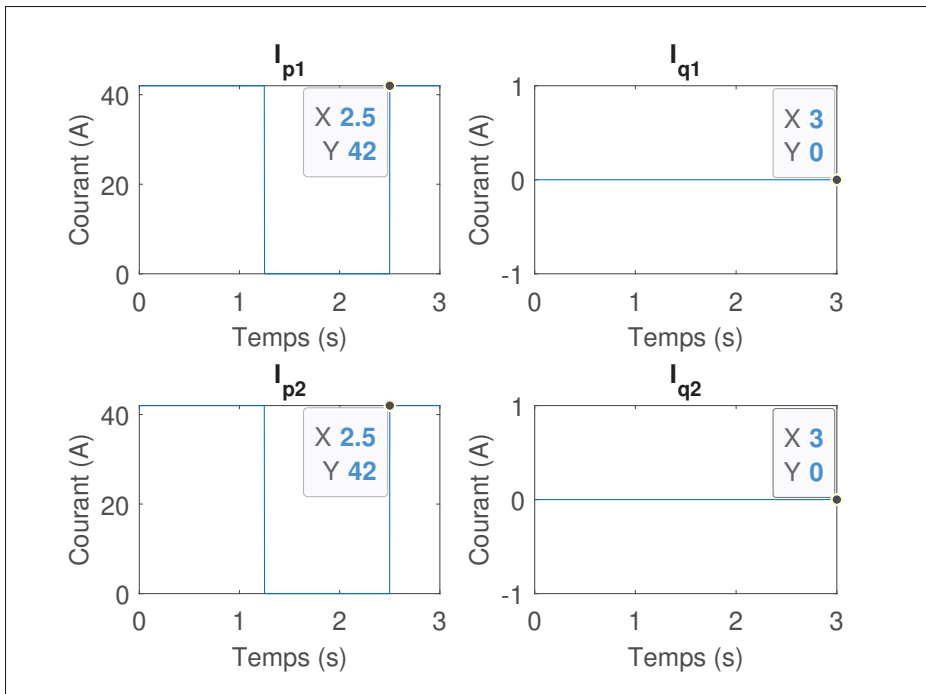


Figure 4.13 Consignes de la machine à état pour le courant  $I_p$  et  $I_q$  des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané

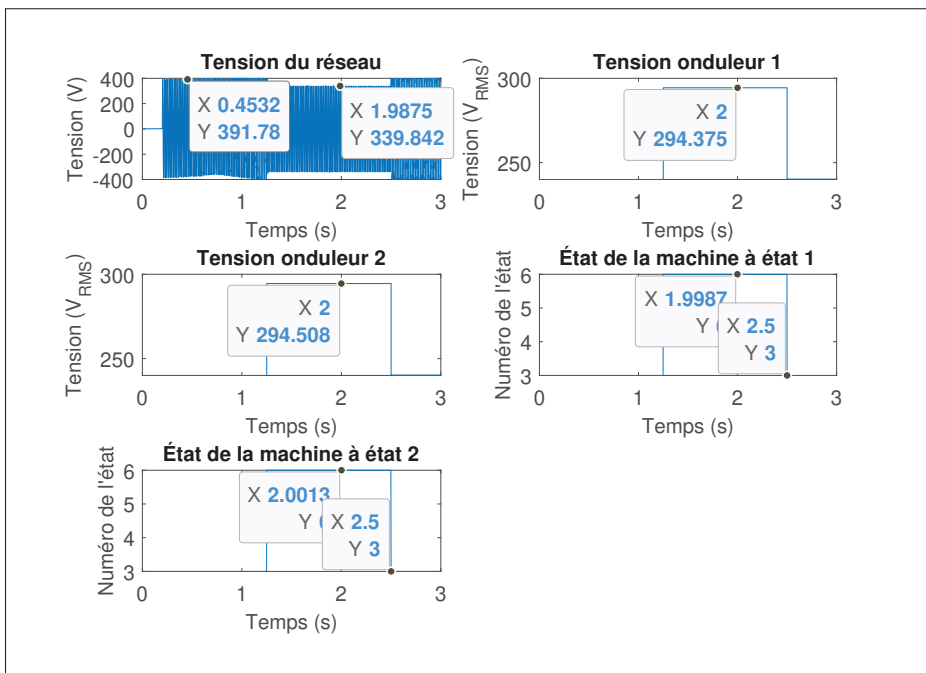


Figure 4.14 Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs en réseau faible pour un contrôle simultané

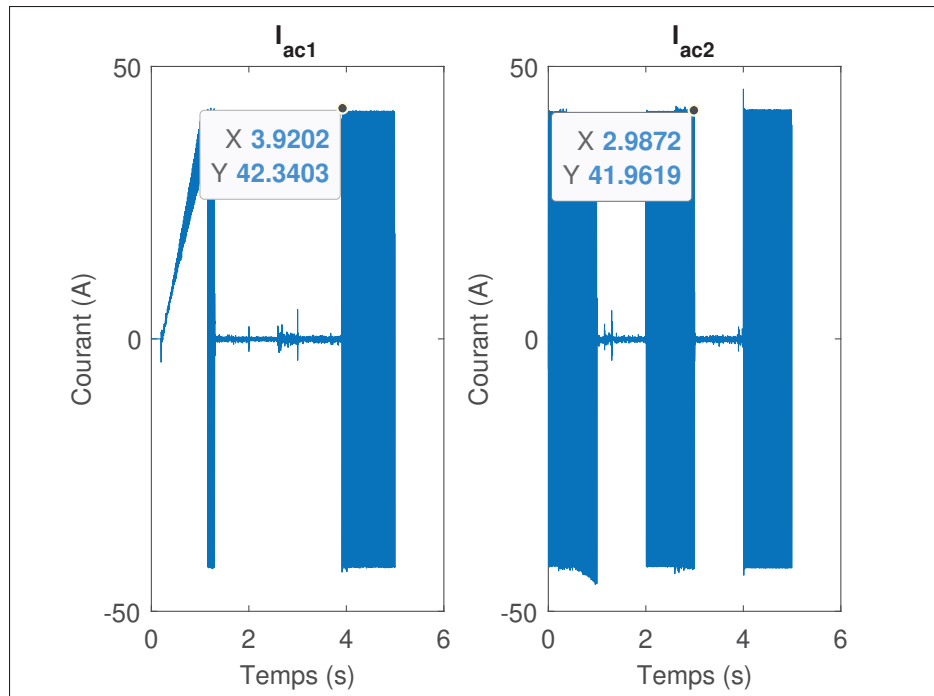


Figure 4.15 Courant injecté dans le réseau des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé

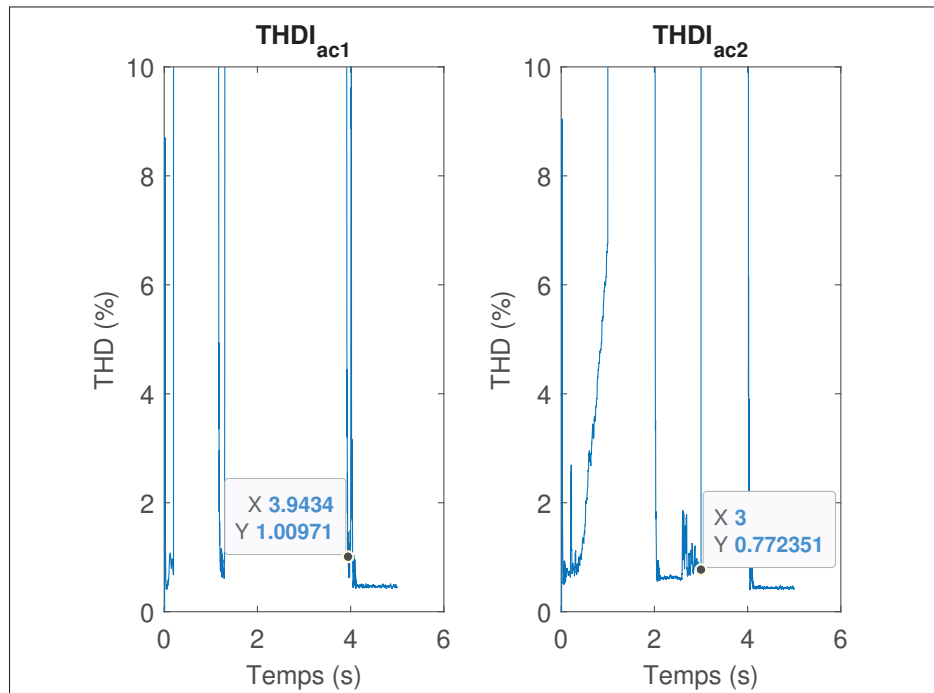


Figure 4.16 THD du courant injecté dans le réseau pour les 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé

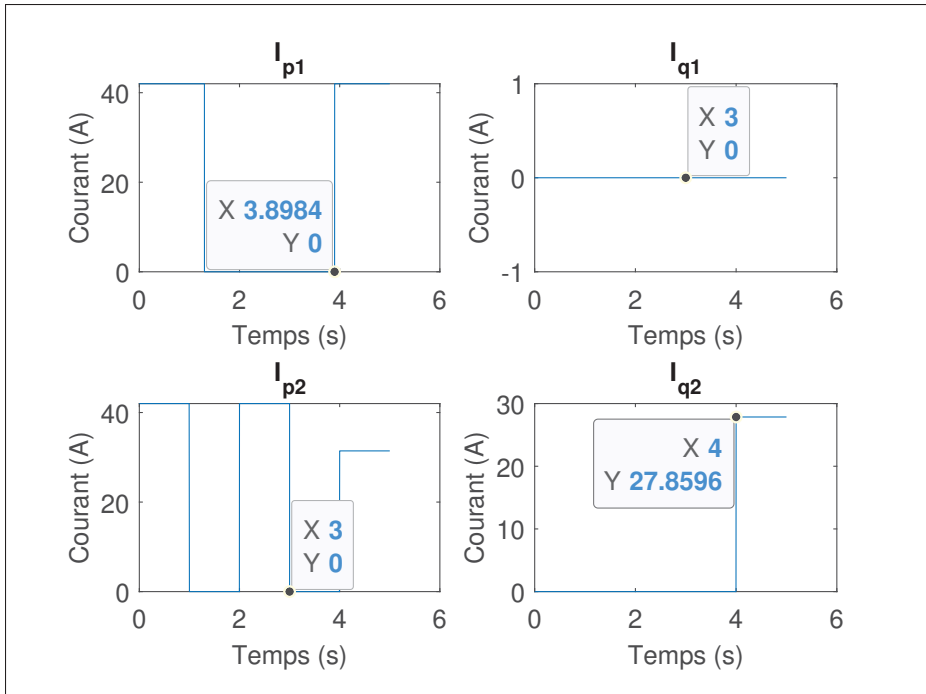


Figure 4.17 Consignes de la machine à état pour le courant  $I_p$  et  $I_q$  des 2 onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé

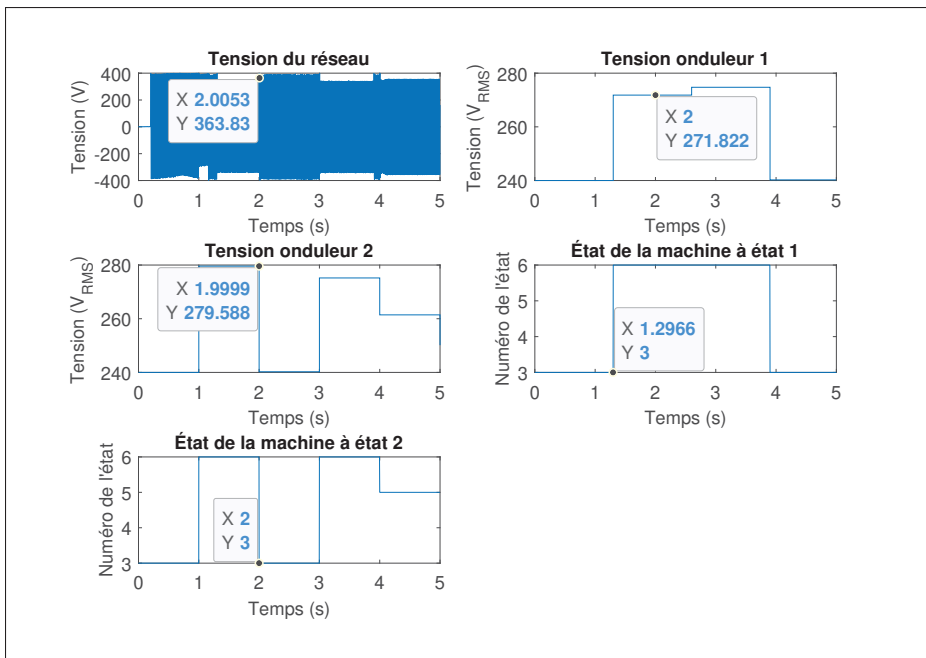


Figure 4.18 Tension aux bornes et état de la machine à état des deux onduleurs en réseau faible pour un contrôle décalé

La situation analysée précédemment suscite un enjeu auquel il faut se préparer. Cette situation peut être considérée comme optimiste, car le mode de contrôle utilisé par les deux onduleurs est le même, tout comme la technologie et la conception de celui-ci. Il est irréaliste de considérer ce cas dans la réalité, où une multitude de conceptions existent ayant chacun leurs avantages et inconvénients, avec une gamme de qualité variant de l'économe au dispendieux. Il est donc facile d'anticiper un enjeu où il sera important de coordonner avec des algorithmes plus sophistiqués le moment où chaque convertisseur devra agir, de façon à éviter une surcompensation.

Une autre avenue pouvant être considérée pour régler cette problématique est l'ajout d'un deuxième onduleur pour intégrer les onduleurs en paire. Cependant, ce deuxième onduleur ne produit pas de puissance active, mais agit en tant que STATCOM en contrôlant seulement la puissance réactive. Un réseau faible étant caractérisé par de grandes variations de tensions lors de perturbations au régime permanent, ce STATCOM permet d'aider à réguler la tension au point de raccordement et potentiellement pallier en partie la problématique d'intégration massive d'onduleurs qui ne communiquent pas entre eux. Pour valider cette hypothèse, deux onduleurs développés au chapitre 3 sont reliés au même transformateur de distribution, ainsi qu'un modèle STATCOM. Cependant, après multiples tentatives de simulations, un enjeu de performance matérielle <sup>1</sup> rend impossible de simuler plusieurs secondes afin d'observer de façon acceptable la réponse des onduleurs. Afin de contourner ce problème, un modèle moyen a été établi à partir de la conception de l'onduleur optimisé du chapitre 3. La partie de la commande de l'onduleur a été remplacée par une source de courant contrôlée où on injecte le signal de consigne en provenance du contrôle Volt/Var. L'onduleur et son branchement pour un modèle moyen se retrouvent à la figure 4.20. Cette représentation permet d'obtenir un modèle moyen de l'onduleur, lequel est jugé satisfaisant en termes de précision pour analyser la performance sur la régulation de tension au point de raccordement. La régulation de tension étant une action se produisant dans l'intervalle de temps des secondes, elle est beaucoup plus lente que le pas de temps utilisé dans les simulations. Cette relation permet d'être rassuré que le phénomène soit bien capté par la simulation. Le pas de temps demeure relativement petit, car la PLL demeure

---

<sup>1</sup> Malgré l'utilisation d'un ordinateur à forte capacité de calcul.

active et identique afin de déterminer la phase du courant qui sera injecté par la source de courant contrôlée. Ce modèle moyen est donc constitué de la PLL fournissant la phase du courant à injecter, du contrôle Volt/Var permettant de déterminer les consignes de courant  $i_p$  et  $i_q$ , le tout se retrouvant multiplié par des fonctions sinus et cosinus permettant d'obtenir un courant d'amplitude et de phase désirée. À titre de comparaison, on peut observer aux figures 4.21 à 4.24 le contrôle du modèle en commutation équivalent. La PLL et la représentation du réseau quant à eux demeurent, la ligne de distribution et un équivalent du réseau de transport sont représentés par leurs impédances Thévenin équivalentes. Les paramètres du transformateur quant à eux sont illustré à la figure 4.19. Ensuite, une impédance équivalente de réseau de transport est utilisée dans les simulations afin de bien caractériser l'état du réseau en amont pour diverses situations. Cette valeur d'impédance provient de O.Tremblay *et al.* (2022). En effet, plus le réseau en amont de la ligne de distribution est dégradé, ce qui équivaut à avoir des éléments tels que des lignes ou des transformateurs indisponibles, plus grande sera l'impédance perçue par l'onduleur. Cette impédance peut aussi varier selon la configuration du réseau alimentant la ligne où l'onduleur est raccordé. Si cette ligne n'est pas dans sa configuration habituelle et qu'elle est alimentée par une autre source ou que celle-ci est plus éloignée électriquement (plus d'impédance entre le PCC et la source électrique), l'onduleur percevra une impédance plus élevée à ses bornes. Avec cette nouvelle modélisation des onduleurs, il devient possible d'observer le comportement des deux onduleurs pour une plus longue durée sans être limité par des enjeux de performances logicielles.

Il est donc possible d'observer à la figure 4.25 que pour un réseau fort, un contrôle simultané des deux onduleurs occasionne une surcompensation, ce qui se traduit par une hausse de tension aux bornes des onduleurs. Cette hausse est assez importante pour entraîner un changement d'état au mode 6 (4e graphique), ce qui bloque l'onduleur, car les conditions d'opérations sont hors limites de la IEEE 1547-2018. Une fois les onduleurs bloqués, la tension revient dans une plage acceptable, ce qui entraîne un autre changement d'état. Ce changement d'état se produit ainsi à chaque fois que le contrôle Volt/Var tente de réguler la tension. Afin de régler la problématique, il fut évoqué plus tôt dans ce chapitre d'utiliser un contrôle décalé afin de régler



Block Parameters: Linear Transformer 75 kVA 4

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:  
[75e3,60]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(H)]:  
[240 0.0075 150e-06]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(ohm) L2(H)]:  
[240 0.00 0]

Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(ohm) L3(H)]:  
[120 0.00384 0]

Magnetization resistance and inductance [Rm(ohm) Lm(H)]:  
[38.4 0.10186]

Measurements None

OK Cancel Help Apply

Figure 4.19 Paramètres du transformateur de distribution, modèle moyen

la problématique de surcompensation. Dans la figure 4.26, on peut observer le comportement du même onduleur qu'à la figure 4.25, mais où le contrôle de l'autre onduleur est décalé de 0,25 seconde. On peut observer qu'il y a quand même une oscillation dans le mode de contrôle de l'onduleur. Par contre, cette oscillation est entre les modes 3 et 5, ce qui permet à l'onduleur de

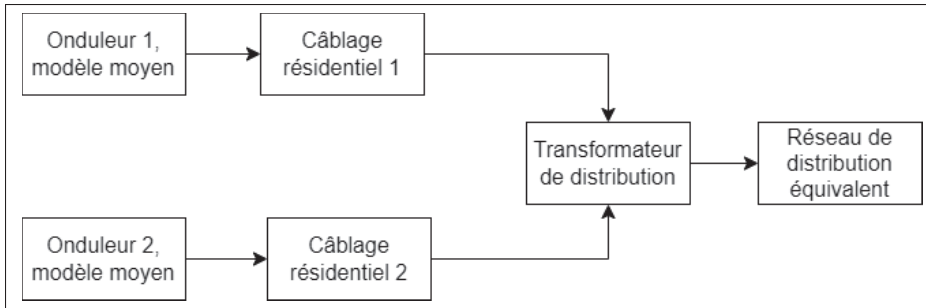


Figure 4.20 Modèle Simulink de deux onduleurs avec leurs modèles moyens

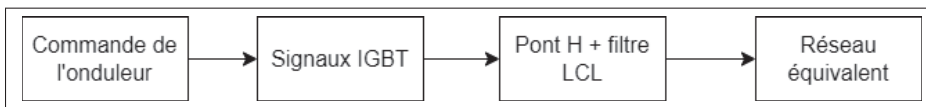


Figure 4.21 Schéma bloc de la commande de l'onduleur générant la référence pour la MLI de l'onduleur

demeurer raccordé au réseau. Cette oscillation est causée par une variation de tension aux bornes de l'onduleur en fonction du courant actif et réactif fourni au réseau. Lorsque celui-ci ramène la tension proche de la valeur de consigne avec du courant réactif, l'onduleur cesse d'injecter de la puissance réactive afin d'opérer en puissance active constante. Cependant, cet arrêt d'injection de courant réactif ramène la tension à un niveau où le contrôle Volt/Var ordonne de nouveau

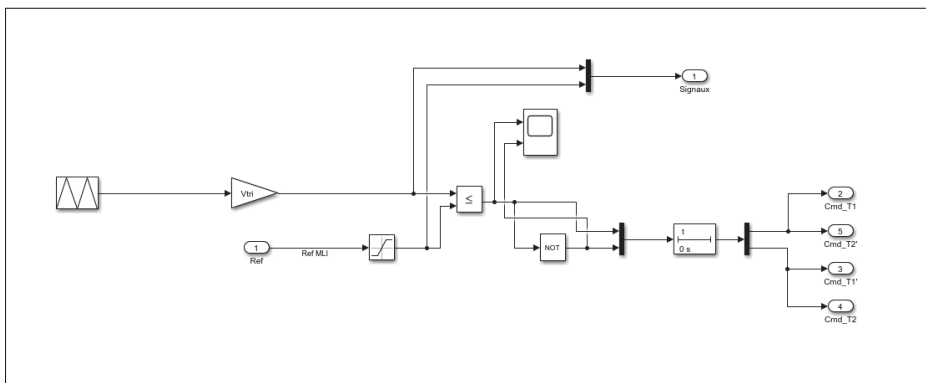


Figure 4.22 Schéma bloc de la génération des signaux de commutations des IGBT

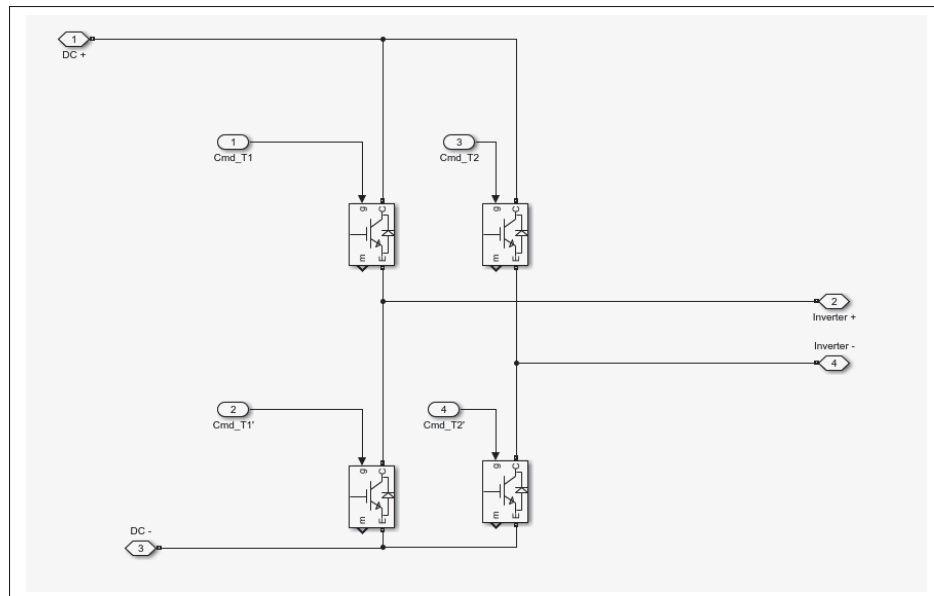


Figure 4.23 Schéma bloc des IGBT de l'onduleur pour le modèle en commutation

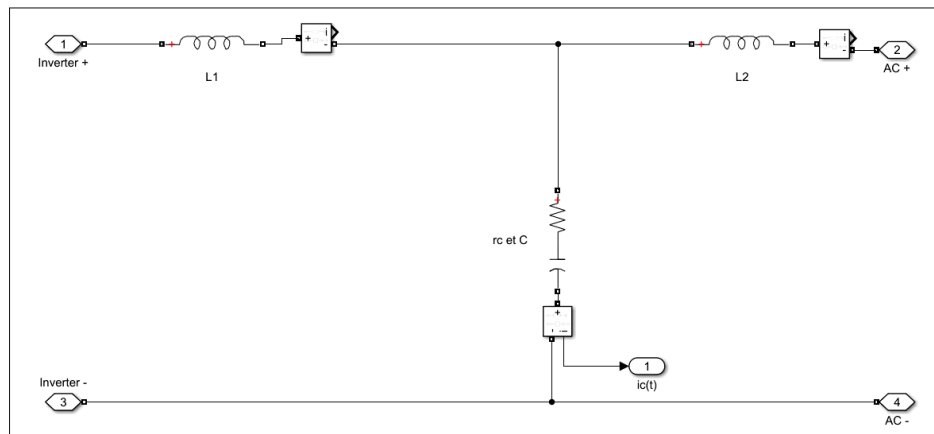


Figure 4.24 Schéma bloc du filtre LCL

l'injection de courant réactif. Ce phénomène est attendu, quoique non optimal. Une fois de plus, une piste d'optimisation pouvant être apportée afin de régler cette oscillation est l'introduction d'un STATCOM. Ce STATCOM possède la même architecture que l'onduleur utilisé dans ce mémoire, incluant son contrôle Volt/Var. Cependant, celui-ci ne peut injecter de la puissance active au réseau. Sa seule contribution est dans l'injection d'un courant réactif afin d'aider à

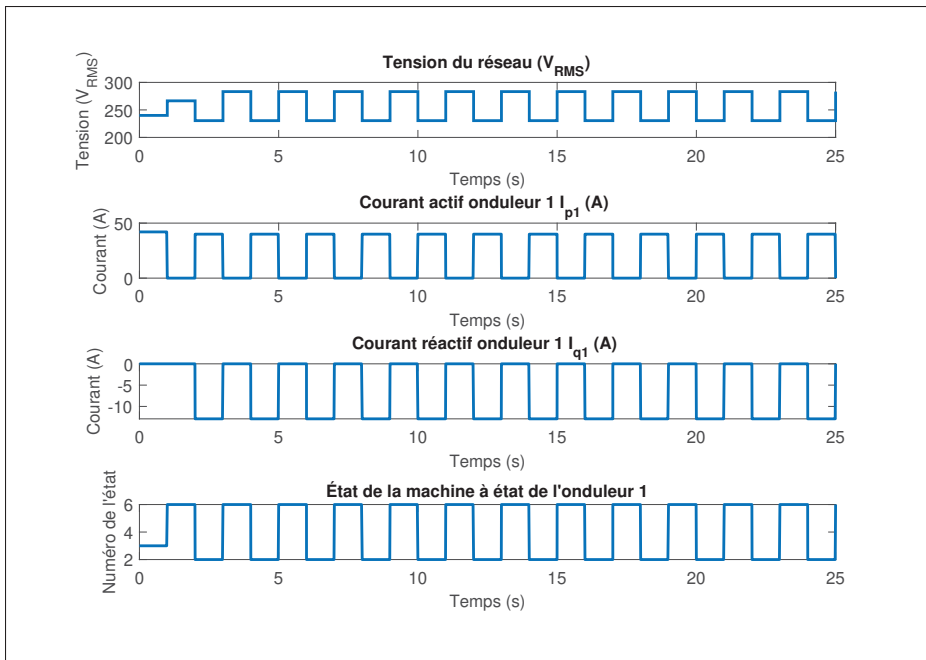


Figure 4.25 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle simultané, réseau fort

maintenir une tension acceptable sur le réseau. Cette solution peut s'avérer intéressante dans les cas où les variations de tension sont importantes aux bornes de l'onduleur, comme le démontre la figure 4.27. On peut observer qu'il suffit que de quelques changements d'état du contrôle Volt/Var des deux onduleurs et du STATCOM avant que la tension se stabilise dans une région acceptable. Le processus complet prend environ 5 secondes avant d'atteindre les valeurs en régime permanent. Il est aussi possible d'observer les résultats pour le deuxième onduleur à la figure 4.28 ainsi que ceux du STATCOM à la figure 4.29 où celui-ci se stabilise après 4.2 secondes. Il est possible de conclure que la présence du STATCOM aide de façon significative à réguler la tension au point d'interconnexion et éviter l'oscillation de la tension.

Les résultats des figures 4.26 à 4.29 démontrent le comportement de plusieurs onduleurs branchés au même POI dans un contexte où on peut qualifier le réseau d'un réseau fort. Cependant, un réseau dit faible est beaucoup plus sensible au niveau de sa tension aux variations de puissances

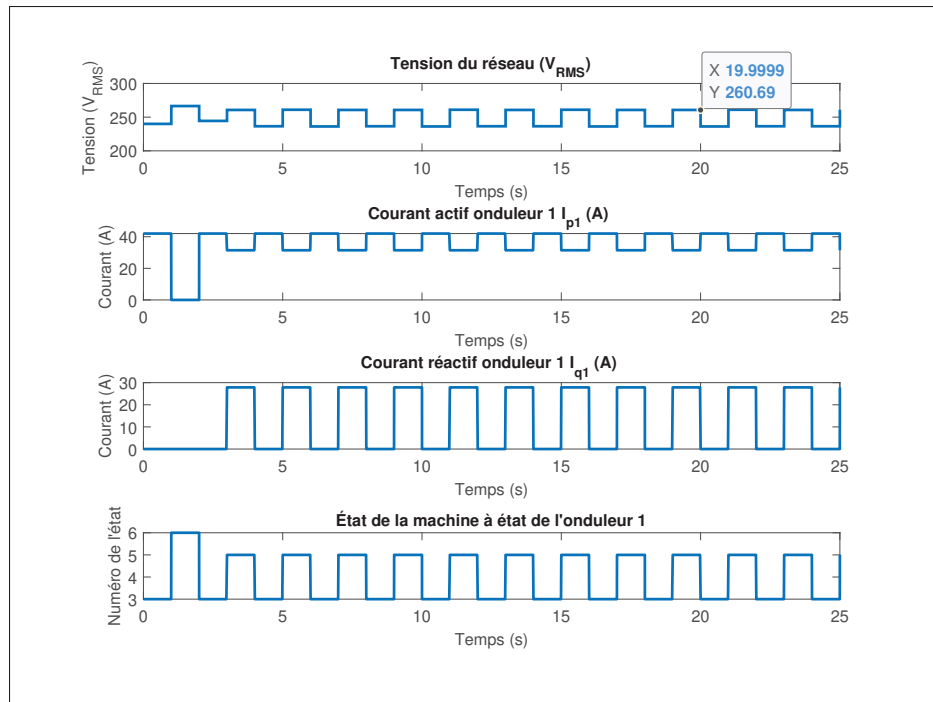


Figure 4.26 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé, réseau fort

active et réactive. De ce fait, un contrôle de tension au POI est beaucoup plus sensible dans cette condition. Les mêmes onduleurs et STATCOM ont été évalués dans un contexte de réseau faible. Le cas comparable à la figure 4.25 en réseau faible est illustré à la figure 4.30. Comme c'est le cas en réseau fort, le même phénomène de surcompensation se produit, mais avec une variation de tension plus importante. En effet, dans le contexte du réseau fort, la tension RMS atteint une valeur d'environ 280V RMS tandis qu'en réseau faible, la tension atteint environ 310V RMS. Il devient donc très facile pour l'onduleur d'excéder les tensions limites pour l'exploitation définie dans IEE (2018). De plus, comme il est possible d'observer aux figures 4.31 et 4.32 que le décalage du calcul du nouvel état du contrôle Volt/Var règle aussi l'enjeu de surcompensation pour un réseau faible. Il est aussi possible d'observer que la tension en réseau faible semble plus stable qu'en réseau fort à la figure 4.26. Ceci est causé par la tension RMS mesurée pour le contrôle. Dans le cas du réseau fort, la tension est légèrement sous le seuil pour passer à l'état 4 suite au blocage à l'état 6 (1.02 pu + 0.01 pu de bande morte). Le cas en réseau faible lui est légèrement au-dessus, ce qui le fait basculer à l'état 4, permettant d'injecter plus rapidement une

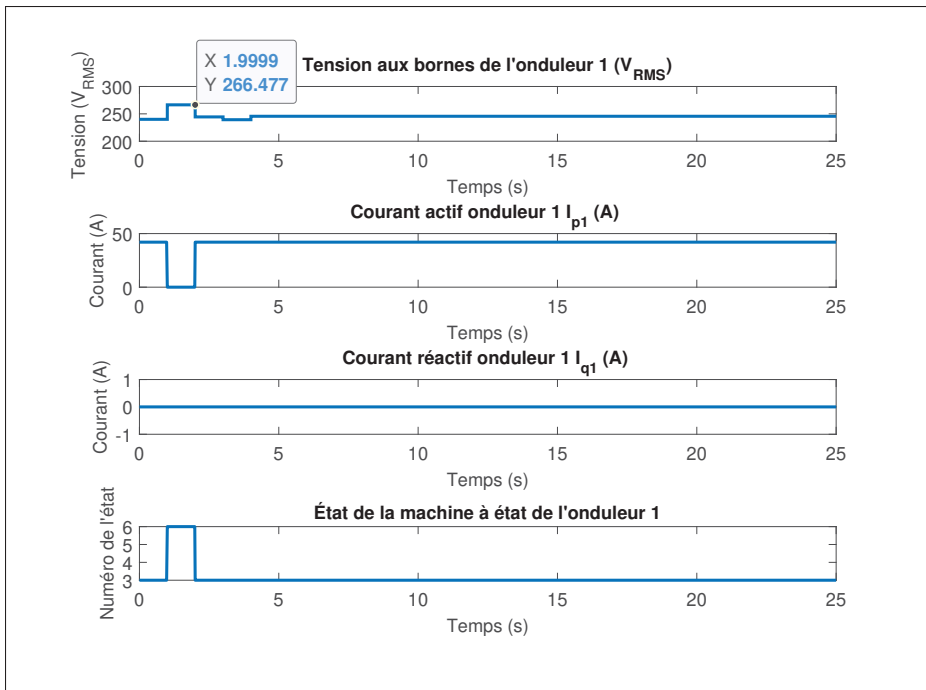


Figure 4.27 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé avec STATCOM, réseau fort

petite quantité de puissance réactive. Cela a pour effet de réduire la tension et stabiliser le tout rapidement, ce qui n'est pas le cas à la figure 4.26. Il se met donc à osciller entre les états 3 et 5 où l'état 3 ne contribue pas en courant réactif à ramener la tension, ce qui occasionne l'oscillation de tension. Finalement, on peut aussi observer aux figures 4.33 à 4.35 le comportement d'un des deux onduleurs en réseau faible lorsque l'on ajoute un STATCOM. Le contrôle de la tension s'effectue de façon exemplaire sans oscillation et en se stabilisant en 5 secondes.

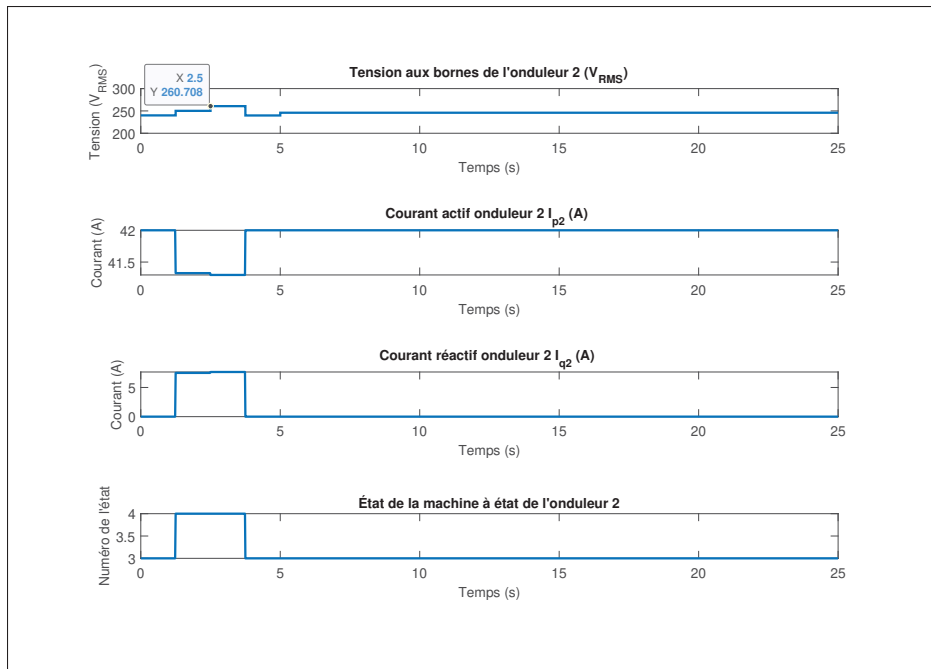


Figure 4.28 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé, réseau fort

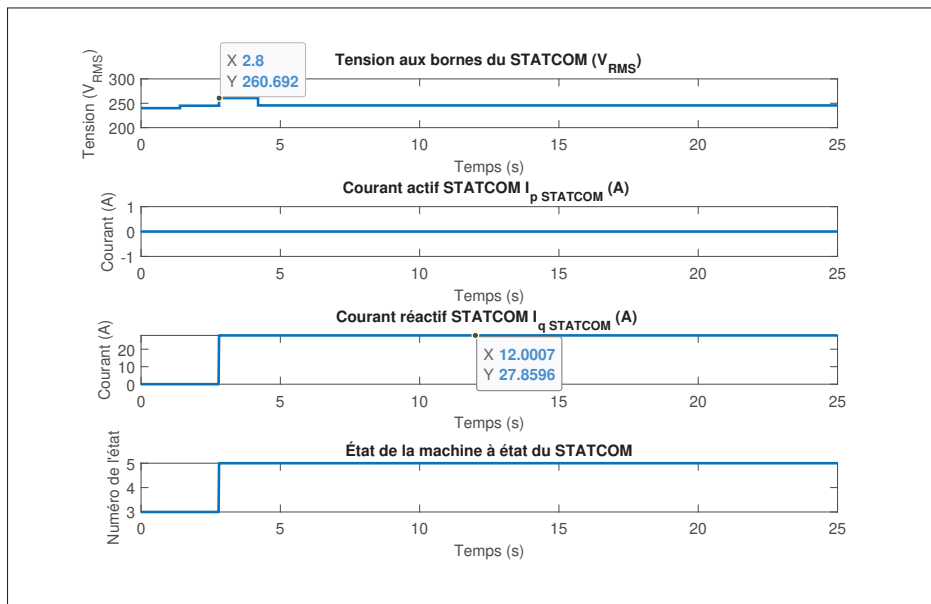


Figure 4.29 Données du contrôle Volt/Var du STATCOM, contrôle décalé, réseau fort

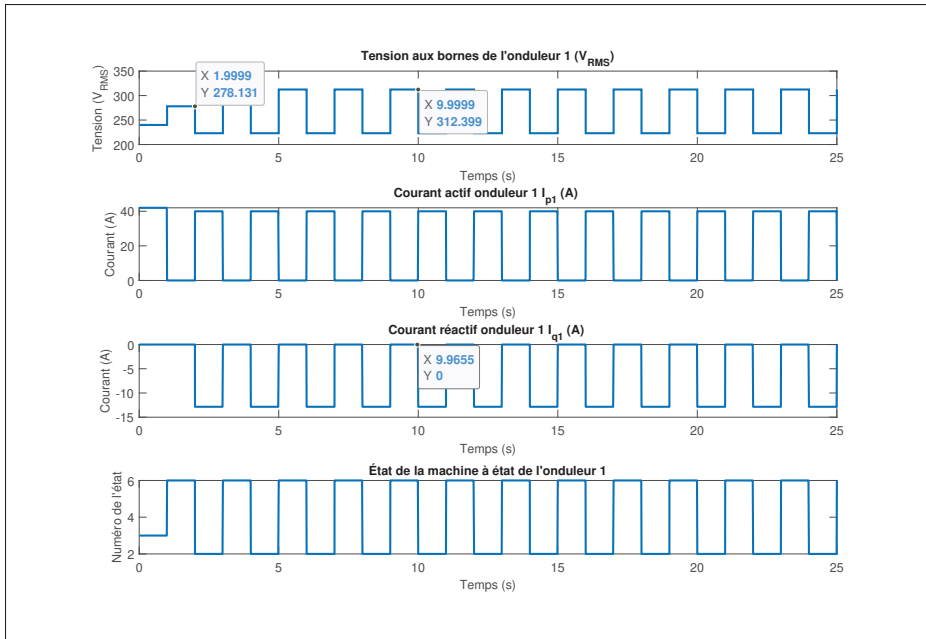


Figure 4.30 Données du contrôle Volt/Var d'un des deux onduleurs, contrôle simultané, réseau faible

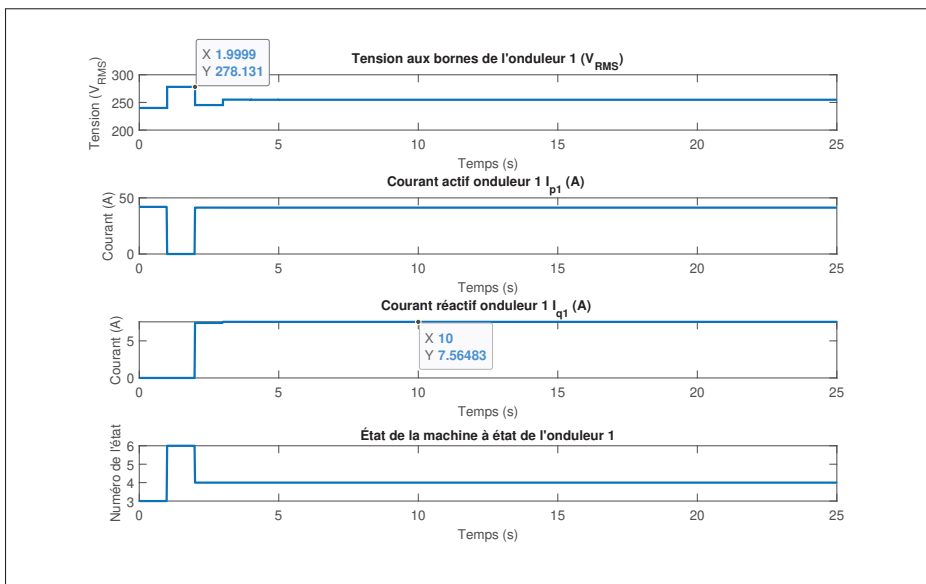


Figure 4.31 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé, réseau faible



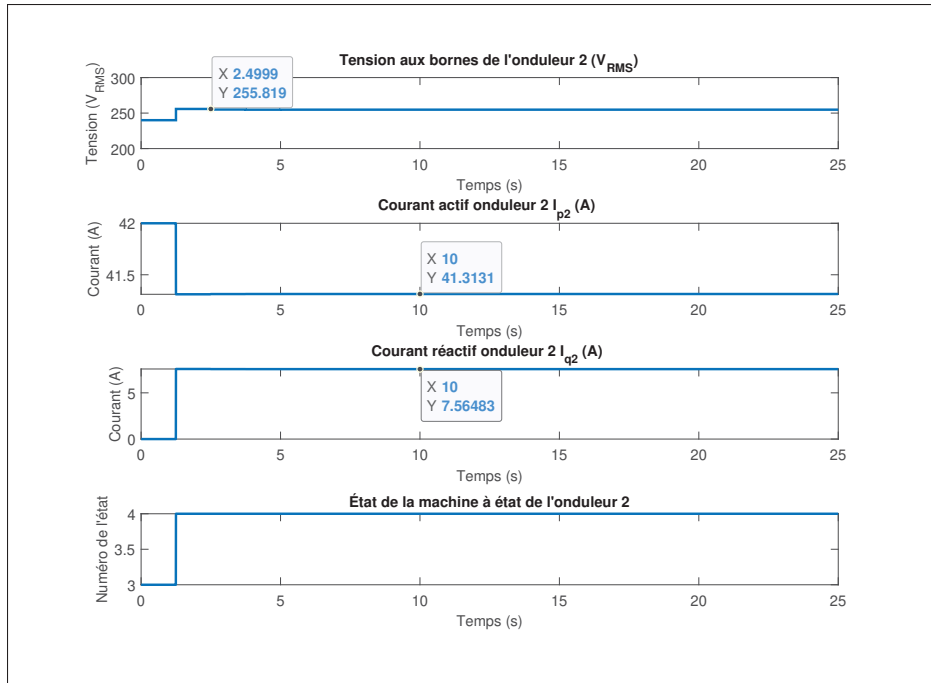


Figure 4.32 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé, réseau faible

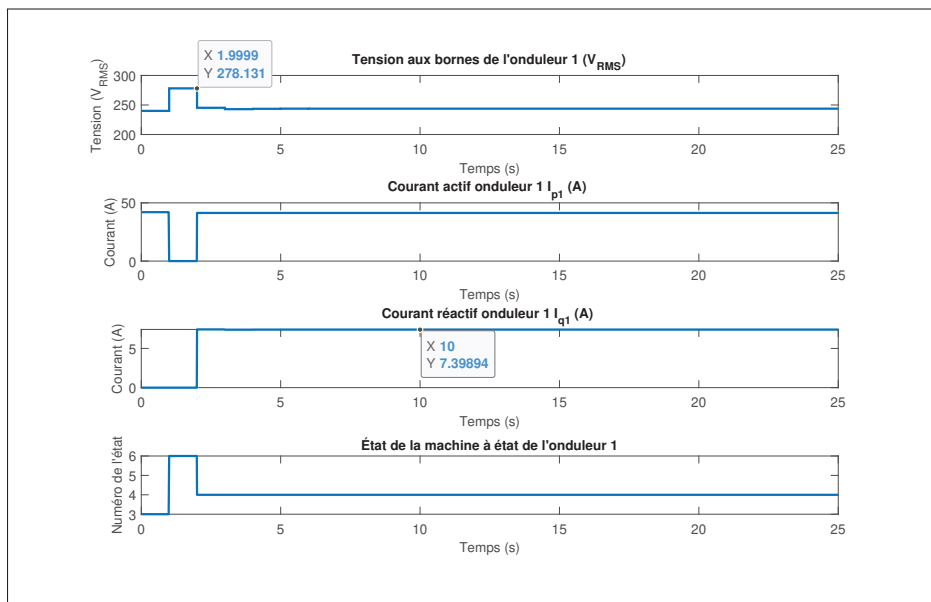


Figure 4.33 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 1, contrôle décalé avec STATCOM, réseau faible

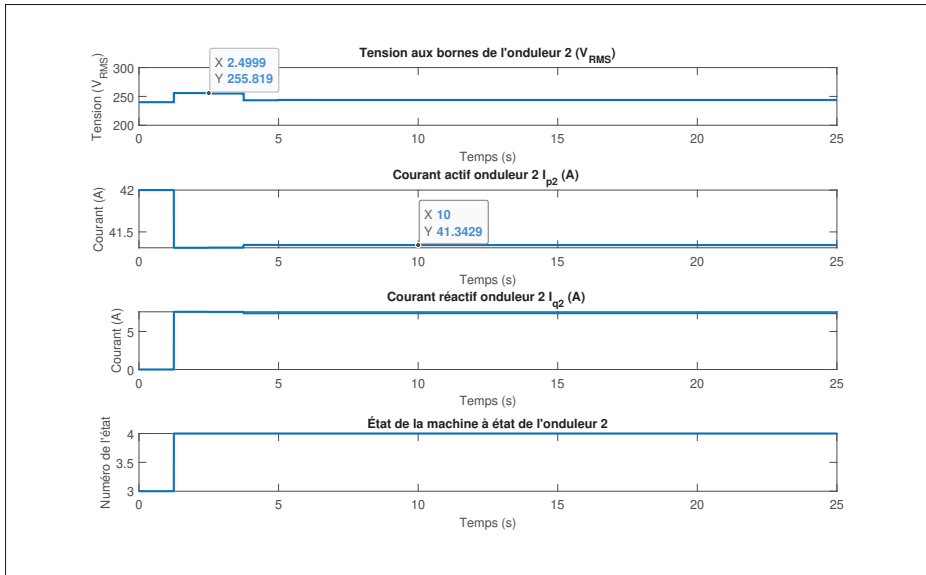


Figure 4.34 Données du contrôle Volt/Var de l'onduleur 2, contrôle décalé avec STATCOM, réseau faible

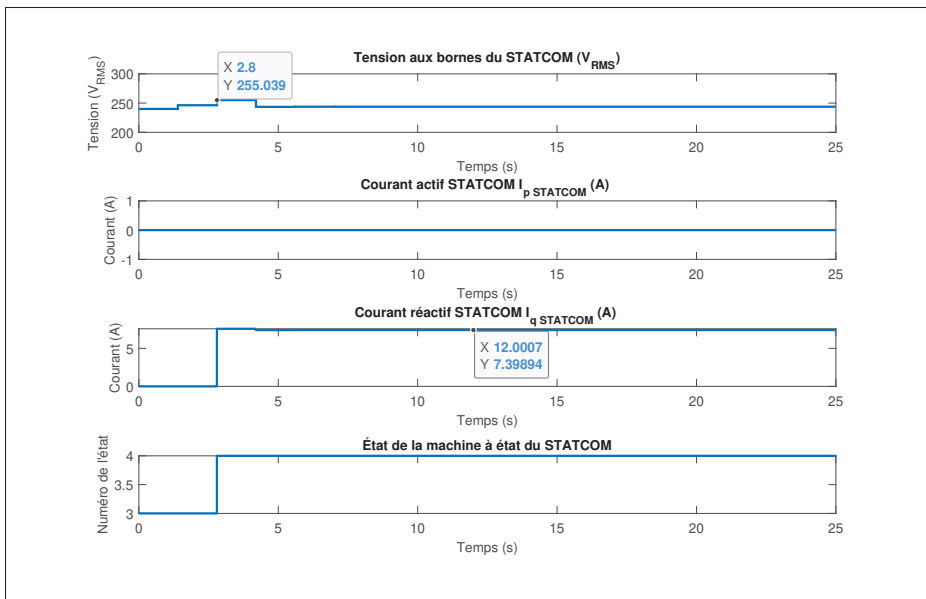


Figure 4.35 Données du contrôle Volt/Var du STATCOM, contrôle décalé, réseau faible

La possibilité d'intégrer plusieurs onduleurs au même POI tout en préservant la stabilité du contrôle et du réseau a été démontrée dans ce chapitre. Une modélisation simplifiée de l'onduleur a été élaborée afin de permettre des simulations d'une durée plus élevée d'être réalisée. Ces simulations plus longues permettent à leur tour d'évaluer le contrôle de ces onduleurs et STATCOM ainsi que les interactions entre ceux-ci sur la régulation de la tension. De plus, le phénomène de surcompensation de l'onduleur a été observé ainsi que des oscillations de tension occasionnées par les réglages. Des solutions à ces enjeux ont été présentées et évaluées, soit : 1) le décalage de la mise à jour du contrôle Volt/Var ainsi que 2) l'ajout d'un STATCOM qui est un autre onduleur ne générant que de la puissance réactive afin d'aider à réguler la tension. Il est possible de conclure qu'autant en réseau fort que faible, il est possible pour l'onduleur de coexister avec d'autres, pourvu que ceux-ci possèdent des réglages compatibles entre eux. Cependant, plus le réseau devient faible, plus les variations de tension deviennent importantes pour des variations de puissances actives et réactives. Ceci peut mener à des instabilités de contrôles (oscillations entre des modes de contrôle comme à la figure 4.25) ou à des déconnexions de l'onduleur par ses mécanismes de protection. Il faut donc porter une attention particulière aux réglages et aux stratégies de contrôle des onduleurs en réseau faible.

### **4.3 Conclusion du chapitre 4**

Suite aux observations et analyses présentées au chapitre 4, il a été possible de conclure qu'il est possible autant en réseau fort qu'en réseau faible d'intégrer plusieurs onduleurs au même POI. Cependant, dépendamment de la sensibilité du réseau en tension au point de raccordement, des moyens ou des précautions doivent être pris afin de permettre une intégration stable des onduleurs. Parmi ces moyens compte l'ajustement des réglages et des temporisations des modes de contrôle, ou simplement l'ajout d'onduleurs remplissant le rôle de STATCOM afin d'aider à réguler la tension au POI. Cependant, un enjeu demeure. Afin de pouvoir déterminer quels moyens mettre en place afin d'assurer une intégration stable de l'onduleur, l'installateur de l'onduleur doit connaître la force du réseau au point de raccordement. Le prochain chapitre

abordera cette problématique et tentera à partir d'intelligence artificielle de base d'estimer l'impédance du réseau vue de ses bornes.

## CHAPITRE 5

### ESTIMATION DE LA VALEUR D'IMPÉDANCE DU RÉSEAU PERÇUE PAR L'ONDULEUR

Au chapitre 4, les simulations ont permis d'établir que la force du réseau a un grand impact sur la performance de l'onduleur et sa capacité à fonctionner dans les critères établis par la IEEE 1547-2018. Un réseau trop faible rend difficile l'intégration de beaucoup d'onduleurs, la tension étant trop sensible aux variations de puissance injectées sur le réseau. Cependant, de bonnes stratégies de contrôles peuvent être utilisées afin de rectifier la situation, par exemple en coordonnant le mode de contrôle des onduleurs ou en ajoutant des équipements supplémentaires comme des STATCOM. Cette problématique n'est toutefois pas toujours présente si l'onduleur est intégré à un point fort du réseau. Cette valeur de réseau fort ou faible est en fait caractérisée en modélisation par l'impédance du réseau perçue par l'onduleur. Il devient donc intéressant de pouvoir estimer cette valeur pour connaître si certaines précautions doivent être intégrées dans le contrôle ou non. De plus, cette impédance réseau peut varier dans le temps, soit par des contingences sur le réseau en amont ou simplement par des changements de configurations. En raison de son importance fondamentale, la présente section abordera une méthode utilisant l'intelligence artificielle afin de tenter d'estimer l'impédance du réseau, plus précisément un réseau de neurones.

#### 5.1 Survol de la structure du perceptron multicouche

Afin d'être en mesure d'estimer l'impédance du réseau, l'algorithme utilisé sera un perceptron multicouche. Cet algorithme fait partie de la catégorie de l'apprentissage profond en intelligence artificielle. Sa structure générale peut être observée à la figure 5.1 tirée de Sarraf & Frigaard (2021). Sa structure est principalement constituée en une série de couches de neurones. Le terme neurone est utilisé, car le comportement de chaque unité est similaire à des neurones. Elles reçoivent plusieurs entrées et fournissent leurs sorties en conséquence. L'information que l'on désire utilisée pour prédire l'impédance est fournie à ce premier étage. Un neurone supplémentaire est aussi présent afin d'introduire un biais si désiré. Ce biais sert à introduire

une variation dans les données d'entrée afin de modifier la réponse de la fonction d'activation et par conséquent le résultat final. Le deuxième étage est ce qu'on désigne comme étant la couche cachée. Le terme couche cachée provient du fait que les données en entrées ne contiennent pas d'information sur la valeur du signal à cette couche Goodfellow, Bengio & Courville (2016). Celle-ci fait l'intermédiaire entre la couche contenant les entrées et la couche de sortie donnant l'impédance du réseau. Le nombre de couches cachées est au choix de l'utilisateur. Un second neurone de biais est ajouté afin d'introduire aussi un second biais si désiré. Finalement, la dernière couche cachée est reliée à la couche de sortie qui délivre le résultat. À noter que comme illustré à la figure 5.1 Sarraf & Frigaard (2021), les nœuds d'une couche communiquent avec tous les autres nœuds de la couche subséquente. De plus, des poids sont utilisés pour relier la dernière couche cachée et la couche de sortie. Ces poids permettent de représenter à quel point une certaine entrée a de l'importance sur le résultat à la sortie. Ceux-ci sont initialisés et ajustés lors de l'entraînement du réseau de neurones afin d'obtenir les meilleures prédictions possibles. Les sections suivantes suivront le processus d'estimation vers la couche de sortie ainsi et la théorie mathématique pour s'y rendre sera illustrée.

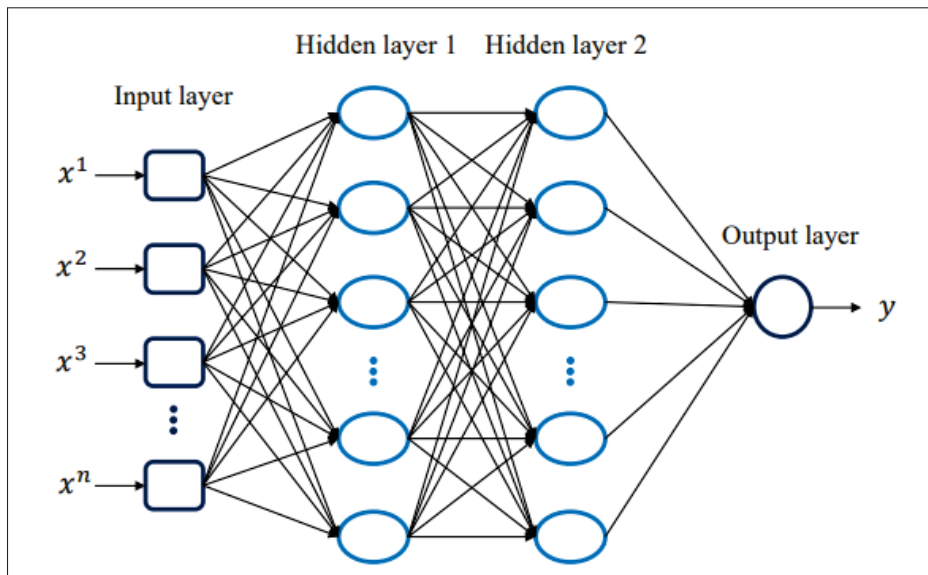


Figure 5.1 Topologie classique d'un MLP  
Tirée de Shirazi, A.S. et Frigaard, I. (2021, p5)

## 5.2 Prétraitement des données et structure de la couche d'entrée

Dans tout problème utilisant de l'intelligence artificielle, il est primordial de s'assurer que les données fournies au modèle soient de qualité. La performance de celui-ci dépend entièrement de ce qu'il reçoit comme information. Cette partie est généralement itérative, car l'on tente de trouver quel format de données engendre les meilleurs résultats. Il est demeuré toutefois vital avant de commencer de tenter d'uniformiser les données, de retirer les extrêmes ou en appliquant des moyennes à d'autres. Ceci permettra à l'algorithme d'être plus robuste dans ses prédictions.

Dans le cadre de ce mémoire, les entrées utilisées sont l'amplitude et l'angle de la tension du réseau suite à une transformée de Fourier pour obtenir la composante à la fréquence fondamentale du réseau ainsi que le courant  $I_p$  et  $I_q$  de l'onduleur. Le réseau simulé possède le mode de régulation Volt/Var actif. Les simulations sont roulées pour des inductances de 1mH à 4,0mH par bond de 0,1mH. Le même ratio résistance et inductance est utilisé que lors des précédents chapitres de ce mémoire, soit une résistance de 0,2  $\Omega$  pour une inductance de 1mH. Pour chaque impédance, trois simulations sont effectuées avec des consignes de courant  $I_p$  soit 14A, 28A et 42A. Le but de ces simulations est premièrement d'évaluer si le contrôle Volt/Var doit effectuer un changement sur la consigne de puissance de l'onduleur afin de maintenir une tension acceptable sur le réseau. Ensuite, si un changement de consigne est effectué, la variation de tension engendrée par la variation de courant est enregistrée.. Donc pour chaque simulation, les données en entrées du réseau de neurones sont enregistrées avant l'action du contrôle Volt/Var ainsi qu'après celui-ci. La variation sera nulle si aucune action n'est effectuée par le contrôle. C'est cette variation pour chaque condition de réseau qui sera fournie dans la couche d'entrée du réseau de neurones.

Les données sont typiquement séparées en 3 parties distinctes. Il y a deux séries de données utilisées pour entraîner l'algorithme d'intelligence artificielle, et une autre pour évaluer l'algorithme suite à son entraînement. Il est important que ces deux ensembles de données soient indépendants l'un de l'autre. Cela est requis pour s'assurer que le modèle est en mesure d'effectuer

de bonnes prédictions sur des données qu'il n'a jamais observées auparavant Y.Xu & Goodacre (2018). Le ratio entre le nombre de données pour l'entraînement et la validation peut être ajusté si l'algorithme a une mauvaise performance. Dans le cas de ce mémoire, un ratio de 75% et 25% a été utilisé pour les données d'entraînement et de validation respectivement. De plus, une seconde séparation se fait dans le nombre d'échantillons pour l'entraînement, car celui-ci peut évaluer à chaque itération la performance nouvelle du modèle. Dans le cas de ce mémoire, 90% de ces données seront utilisés pour l'entraînement (90% du 75%) et 10% pour l'évaluation du modèle.

### 5.3 Couches cachées et fonction d'activation

Comme démontrée à la section 5.1, la couche d'entrée est ensuite reliée aux couches cachées. Chacun des neurones d'entrées est relié à chaque neurone de la couche cachée et possède un *poids*. Ce poids est un facteur qui sera ajusté afin de tenter de déterminer quelle entrée a le plus d'impact sur la performance du modèle. Si une entrée agit de manière importante sur la valeur de sortie, le poids de cette entrée sera ajusté à une valeur plus élevée que les autres. La valeur d'un neurone de la couche cachée sera donc déterminée par le produit d'une entrée et de son poids respectif où on ajoutera le biais s'il en possède un. Une analogie peut être effectuée avec une relation linéaire  $y = mx + b$  où  $y$  est la sortie du neurone,  $x$  son entrée,  $m$  le poids et  $b$  le biais. Si plusieurs entrées sont utilisées dans le modèle, ce qui est le cas dans ce mémoire, cela créera une matrice de 4 éléments, soit une valeur pour chaque entrée. La somme de ces entrées est ensuite réalisée à chaque neurone. Cette somme passe ensuite dans une fonction d'activation qui déterminera la valeur qui sera à la sortie du neurone vers la prochaine couche. Cette fonction d'activation peut être ajustée en fonction du problème à résoudre. Dans le cas de ce mémoire, la fonction ReLU (Rectified linear unit) sera utilisée. Elle possède l'avantage d'être dérivable en tout point à l'exception de moment auquel elle présente une valeur nulle Krishnamurthy (2022). Ceci peut être contourné en lui appliquant une valeur de dérivée nulle lorsque c'est le cas. La fonction d'activation ReLU peut être observée à l'équation 5.1.



$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ x & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Cette opération est répétée pour chaque neurone des couches cachées subséquentes jusqu'à ce que le modèle atteigne la dernière couche avant celle de sortie. Cette opération se nomme propagation avant. Une fois la propagation avant terminée, le modèle émet une prédiction sur la valeur qu'on tentait d'évaluer. Cette prédiction maintenant disponible, il est possible de procéder aux prochaines étapes pour entraîner le modèle.

#### 5.4 Fonction de coût et propagation arrière

Une fois la propagation avant terminée et qu'une valeur de prédiction a été émise, il est crucial pour le modèle de s'autoévaluer et de tenter de s'améliorer. Afin d'être en mesure d'effectuer cette tâche, celui-ci doit être en mesure de s'autoévaluer sur la qualité de sa prédiction et d'ajuster ses paramètres pour que la prochaine propagation avant donne de meilleurs résultats. Ces deux étapes se prénomment la fonction de coût et la propagation arrière respectivement.

La fonction de coût est une fonction permettant d'apprécier la qualité de la prédiction. Plusieurs fonctions existent, mais celle utilisée dans ce mémoire sera l'erreur moyenne absolue. Cette métrique a été choisie dû à la nature de la valeur qui doit être évaluée, soit la valeur de l'impédance qui est une valeur numérique qui peut prendre une valeur dans un intervalle connu. Elle peut être représentée par la formule 5.2.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{pi} - y_i|}{n} \quad (5.2)$$

Cette fonction permet à l'algorithme de déterminer si ses poids sont bien calibrés pour obtenir une prédiction acceptable. Celui-ci tente à chaque itération de minimiser cette valeur. Pour y arriver, l'algorithme effectue une propagation arrière afin de mettre à jour ses poids. Après avoir obtenu la valeur de l'erreur moyenne absolue, celui-ci tente de mettre à jour chacun de ses

poids en effectuant le gradient de cette erreur. Cette opération de gradient dans notre cas utilise l'optimisateur RMSprop, qui permet d'effectuer le gradient sur de petits échantillons, ce qui améliore la vitesse de convergence Huang (2020). Les nouveaux poids peuvent être calculés avec l'expression suivante :

$$W'_n = W_n - \eta \nabla_{\mu}(W_n) \quad (5.3)$$

Où  $\eta$  est le taux d'apprentissage de l'algorithme. Ce coefficient dictera l'impact de chaque propagation arrière sur la valeur des poids. Une partie du problème à résoudre est de déterminer quelle sera sa valeur, car une valeur trop petite fera en sorte qu'un très grand nombre d'itérations seront nécessaires avant d'atteindre une solution optimale. Une valeur excessive en revanche fera osciller le système et la convergence en sera affectée. Les étapes de propagation avant, de la fonction de coût et de la propagation arrière peuvent être effectués un grand nombre de fois au choix de l'utilisateur. Ce processus sera ensuite arrêté si l'utilisateur juge que l'algorithme a atteint la précision désirée ou si l'on veut modifier un paramètre, car il ne réussit pas à atteindre des prédictions avec la précision désirée.

## 5.5 Prédiction de l'impédance réseau avec le MLP

Un survol de la théorie du MLP a été effectué dans les sections précédentes. Maintenant que la base de la théorie a été expliquée, l'algorithme sera utilisé pour tenter de prédire l'impédance du réseau perçu par l'onduleur. Afin d'effectuer cette prédiction, l'algorithme du MLP sera utilisé. Celui-ci a été implémenté grâce aux fonctions de la librairie Keras, qui est l'API de haut niveau de Tensorflow. Le code complet de l'algorithme est à l'annexe V de ce document. Les données de simulations ont été obtenues grâce aux simulations effectuées sur le modèle d'onduleur développé aux chapitres 1 et 2 en conservant le mode de contrôle Volt/Var actif ainsi que la valeur de résistance  $r_c$  de  $0,5 \Omega$ . Les gains de la PLL sont aussi ceux établis au chapitre 3 et ils sont utilisés pour l'onduleur de 10kVA. Puisque celui-ci se trouve du côté secondaire du transformateur de distribution, il injecte vers un équivalent réseau ramené au primaire d'un transformateur de distribution. Le schéma du système peut être observé à la figure 5.2. Les

paramètres utilisés pour les simulations ainsi que pour le MLP sont groupés dans le tableau 5.1. Les données utilisées pour entraîner et évaluer le MLP se retrouvent à l'annexe IV. Lors

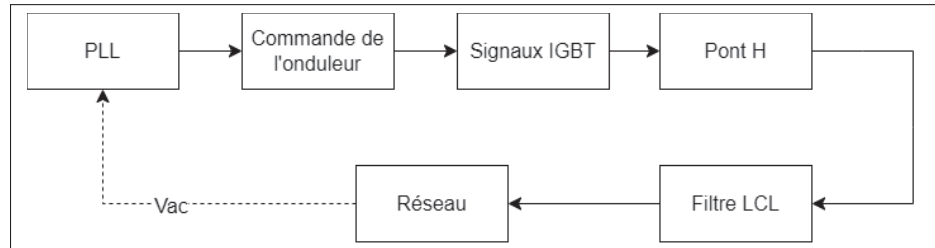


Figure 5.2 Schéma bloc du modèle d'onduleur utilisé pour obtenir les données utilisées par le MLP

Tableau 5.1 Paramètres de l'algorithme MLP

Paramètres	Valeur
Pourcentage des données pour l'entraînement	75%
Pourcentage des données pour la validation	25%
Nombre de neurones d'entrées	4
Nombre de neurones cachées	64
Nombre de neurones de sorties	1
Fonction de coût	Erreur moyenne absolue (MAE)
Optimisateur	RMSProp
Nombre d'itérations	20 000
Nombre d'échantillons par essai	120
Séparation de l'échantillon de l'entraînement	0,1

de l'évaluation du MLP, il est possible de constater que celui-ci prédit l'impédance du réseau avec une précision acceptable dans la majorité des cas, soit un écart moyen de 5% par rapport à la valeur d'inductance réelle. Une portion des résultats peuvent être observés dans le tableau 5.2. Les résultats en entier peuvent être observés à l'annexe III. Celui-ci prédit la valeur de l'inductance avec une erreur moyenne absolue de 0.048 ou 48 $\mu$ H ce qui est largement suffisant pour déterminer si le réseau est fort ou faible. Un fait intéressant est que l'on remarque que pour des réseaux faibles, une meilleure précision est atteinte lorsque le courant actif injecté est maximisé. Ceci peut être expliqué par le fait que la tension d'un réseau faible est plus sensible à des variations de puissance. En étant plus sensible, il est plus facile pour le MLP de caractériser

l'impact de ce changement de puissance. Celui-ci perçoit une plus grande différence dans le comportement du réseau pour chaque bond d'impédance et sera en mesure ainsi de bien prédire cette même impédance. À noter cependant que dans les cas simulés, il n'y avait pas de présence de puissance réactive. Lorsque celle-ci est intégrée à l'algorithme du MLP, l'erreur sur la prédiction se voit augmenter de façon significative, et ce principalement pour les scénarios où la puissance active injectée est faible. Une hypothèse pouvant expliquer ces résultats est que lors d'une faible injection de puissance active, si la puissance réactive injectée est non négligeable, elle aura tendance à affecter davantage la tension aux bornes de l'onduleur que la puissance active. Cette tension est l'aspect le plus important pour juger de la force du réseau en fonction de la puissance active injectée. Par contre, les performances en cas d'injection de puissance réactive pourraient être améliorées en fournissant plus d'échantillons pour l'entraînement de l'algorithme. Celui-ci posséderait plus de points d'opération combinant différents trios d'impédances de réseaux, de courant actif et de courant réactif, ce qui lui permettra d'effectuer une meilleure prédiction. Étant donné la longueur des simulations requises pour obtenir les données et que générer ces nouveaux intrants requiert potentiellement 4 à 5 fois le nombre de données actuellement, elle ne sera pas abordée dans cette section et se vaut plus une recommandation pour un prochain ouvrage. Le code complet en python afin de réaliser l'estimation d'impédance est fourni à l'annexe V. Les valeurs d'impédance sont fournies en Henry, car le ratio résistance et réactance est gardé constant et les valeurs sont plus facilement comparable lorsque l'algorithme tente d'estimer la réactance. La performance de l'IA a été validée par simulation grâce aux résultats illustrés précédemment. Cependant, il devient intéressant de valider la performance de celui-ci avec des données expérimentales. Un convertisseur générique a été utilisé afin d'obtenir ces résultats. Quatre essais ont été effectués, soit l'augmentation de la consigne de 10A, de 20A ainsi qu'une réduction de consigne de 10A et 20A. Ces quatre essais ont été réalisés avec une inductance de 1mH à la sortie. Les courbes d'essais sont représentées aux figures 5.3 à 5.6. Les différences de tension ainsi que le résultat de la prédiction pour le MLP pour ces variations de courant sont illustrés au tableau 5.3. Afin d'entraîner le MLP, une nouvelle série de simulation a été effectuée afin de reproduire numériquement les 4 essais expérimentaux, mais avec la même gamme d'impédances utilisée dans le tableau III. Les données servant d'intrants au MLP sont la

Tableau 5.2 Résultats de la prédiction sur l'onduleur 120V avec représentation complète des différentes impédances

Valeur attendue (mH)	Valeur estimée (mH)	Écart (mH)
1,10	1,15	0,05
1,10	1,11	0,01
1,10	1,07	-0,03
1,20	1,25	0,05
1,20	1,23	0,03
1,20	1,13	-0,07
1,30	1,35	0,05
...	...	...
2,00	2,05	0,05
2,00	2,07	0,07
2,00	1,97	-0,03
...	...	...
3,80	3,68	-0,12
3,80	3,91	0,11
3,90	3,37	-0,53
3,90	3,76	-0,14
3,90	4,01	0,11
4,00	3,41	-0,59
4,00	3,85	-0,15
4,00	4,10	0,10

différence de tension entre le régime permanent avant la rampe et après, le courant actif et le courant réactif injecté. Les paramètres utilisés pour entraîner le MLP sont présentés au tableau 5.4. Les données utilisées pour entraîner le nouveau MLP sont à l'annexe VI. La performance, lors de l'entraînement du MLP, est aussi illustrée à la figure 5.7.

Tableau 5.3 Résultats expérimentaux pour un onduleur générique

Essai	$V_{debut}(V_{crete})$	$V_{fin}(V_{crete})$	H réelle (mH)	H estimée (mH)
Consigne 10 A inductif	157,31	150,31	1	0,92
Consigne 20 A inductif	157,06	145,19	1	1,18
Consigne 10 A capacitif	157,50	164,25	1	0,75
Consigne 20 A capacitif	157,88	172,25	1	1,12

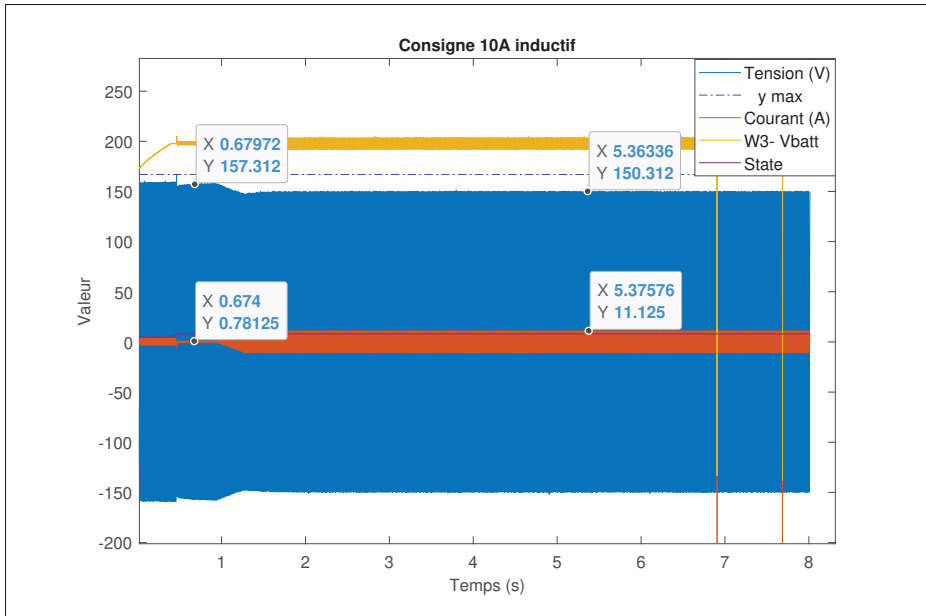


Figure 5.3 Rampe positive de courant de 10A inductif avec l'onduleur générique

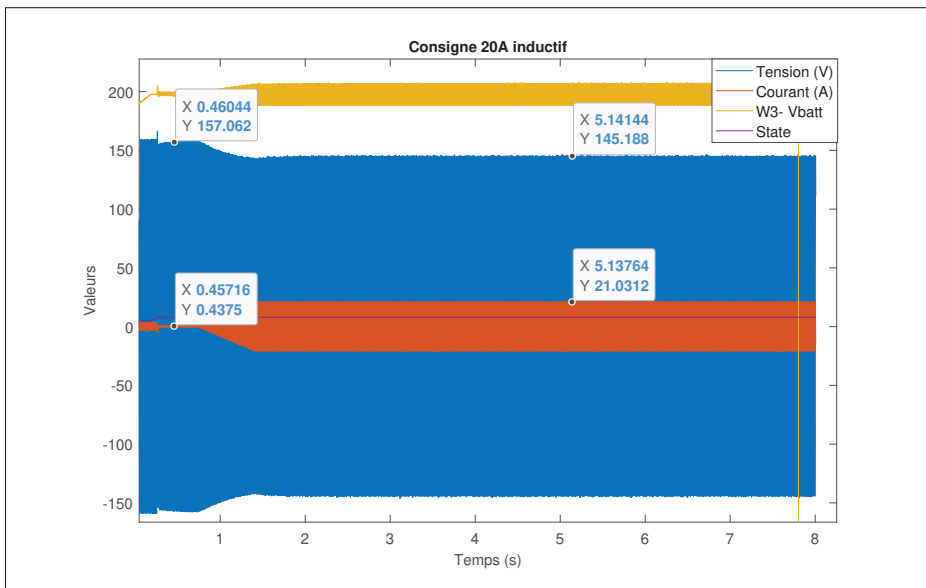


Figure 5.4 Rampe positive de courant de 20A inductif avec l'onduleur générique

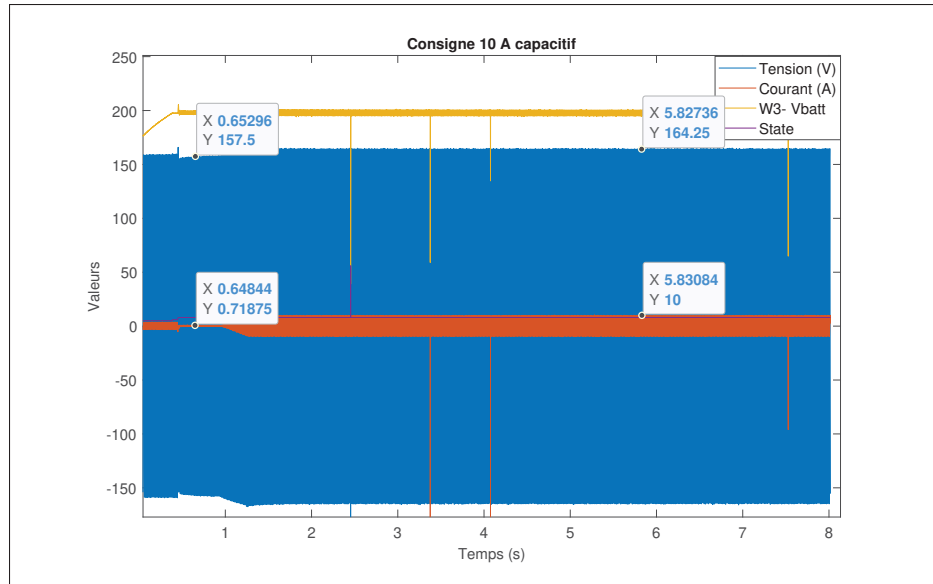


Figure 5.5 Rampe positive de courant de 10A capacitif avec l'onduleur générique

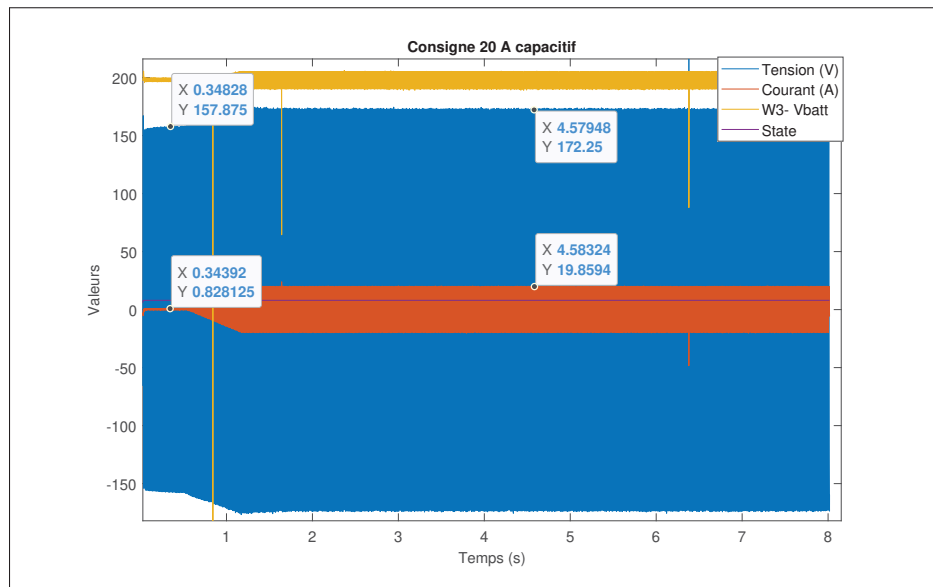


Figure 5.6 Rampe positive de courant de 20A capacitif avec l'onduleur générique

Tableau 5.4 Paramètres de l'algorithme MLP

Paramètres	Valeur
Pourcentage des données pour l'entraînement	50%
Pourcentage des données pour la validation	50%
Nombre de couches d'entrées	3
Nombre de couches cachées	4096
Nombre de couches de sorties	1
Fonction de coût	Erreur moyenne absolue (MAE)
Optimisateur	RMSPProp
Nombre d'itérations	20 000
Nombre d'échantillons par essai	160
Séparation de l'échantillon de l'entraînement	0,2

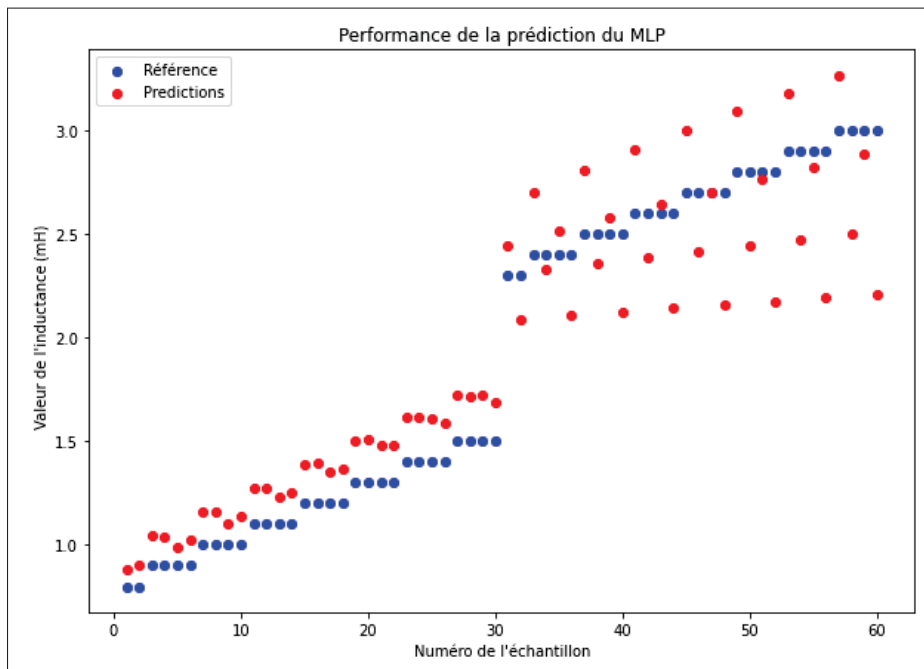


Figure 5.7 Performance de l'IA sur l'estimation de l'impédance réseau en reproduisant les essais expérimentaux



Il est possible d'observer à l'annexe VII que l'onduleur est en mesure d'estimer avec une précision acceptable l'impédance du réseau avec un écart moyen de  $230\mu\text{H}$  pour des inductances variant de  $0,8\text{mH}$  à  $2,3\text{mH}$ . Cependant, en pratique, une erreur moyenne de  $230\mu\text{H}$  ne changera pas la conclusion qui sera tirée de l'impédance, à savoir si on se retrouve en réseau fort ou faible. Il est donc possible de conclure que le MLP permet aussi de prédire l'impédance du réseau pour des données synthétiques, et ce même si l'onduleur se comporte comme un STATCOM en fournissant uniquement du courant réactif pour le réseau. La même conclusion s'applique aux données expérimentales comme illustrées au tableau 5.3. Lorsqu'on tente d'utiliser l'algorithme du MLP pour prédire l'impédance du réseau à partir de données expérimentales, l'erreur demeure légère avec une erreur moyenne de  $160\mu\text{H}$ . Cette différence est suffisamment légère pour conclure que le MLP est en mesure d'évaluer si le réseau est fort ou faible. Il est donc possible d'évaluer la force du réseau avec un onduleur en mode STATCOM en utilisant le MLP. Évidemment, il s'agit d'une méthode spécifique et ceci n'exclut aucunement d'autres approches.

## **5.6 Conclusion du chapitre 5**

Un des enjeux pour le contrôle d'un onduleur, lorsqu'il est relié au réseau de distribution au même POI que d'autres onduleurs, est de connaître l'impédance à laquelle il sera raccordé. Le moyen de l'IA par le biais d'un MLP a été étudié afin de déterminer si cette méthode permet d'estimer l'impédance du réseau avec une précision acceptable. À ce qui a trait à des données synthétiques, soit de simulations, la précision est acceptable avec une erreur moyenne absolue de  $48\mu\text{H}$  pour un onduleur injectant de la puissance active et de  $230\mu\text{H}$  pour un fonctionnement de l'onduleur en STATCOM. La même conclusion s'applique pour des données expérimentales, avec une erreur moyenne de  $160\mu\text{H}$ . Il est donc possible de prédire l'impédance aux bornes de l'onduleur avec un MLP bien calibré.



## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

Le présent mémoire permet d'établir la conception d'un onduleur monophasé et de sa commande afin de raccorder celui-ci au réseau électrique de distribution. Le premier chapitre permet d'établir les fondations de ce travail en survolant la théorie nécessaire pour bien comprendre la conception de l'onduleur. Cette conception est requise pour bien cerner les problématiques de stabilité de l'onduleur monophasé. Un modèle est développé dans ce premier chapitre et sert de point de départ pour les autres parties de cette recherche. Le deuxième chapitre présente des essais permettant de vérifier que l'onduleur conçu est robuste aux perturbations extérieures. Il permet aussi d'établir que le comportement de l'onduleur est bien le comportement attendu en termes de performance, comme le THD du courant injecté dans le réseau par exemple. Le troisième chapitre quant à lui explore des pistes d'optimisation pour l'onduleur décrit au chapitre 1 afin de réduire les pertes et ajouter des fonctionnalités supplémentaires comme le contrôle Volt/Var. La performance de ce nouvel onduleur est ensuite validée pour une large gamme d'impédances afin de vérifier que son fonctionnement est valide dans différentes situations de réseau. Le quatrième chapitre aborde ensuite un enjeu potentiel relié au raccordement de multiples onduleurs sur le même transformateur de distribution. Des enjeux au niveau des contrôles y sont abordés ainsi que des moyens de mitigations pour rectifier la situation. Finalement, au chapitre 5, l'intelligence artificielle est utilisée afin de prédire l'impédance perçue par l'onduleur à partir de résultats de simulations et expérimentaux.

Il fut démontré aux chapitres 3 et 4 que l'impédance perçue par l'onduleur joue un rôle critique dans la stabilité de celui-ci. Une estimation de l'impédance à partir de données disponibles à l'onduleur est une piste intéressante afin de tenter d'augmenter la résilience de l'onduleur face à des événements réseaux. Celui-ci peut ensuite effectuer des actions correctives comme un changement d'algorithme de contrôle ou de ses paramètres pour s'adapter à la situation. L'utilisation d'intelligence artificielle est une des façons d'y arriver, et cela semble possible avec un algorithme d'intelligence artificielle basique comme le MLP.



## CHAPITRE 7

### RECOMMANDATIONS

Le présent mémoire se base sur plusieurs hypothèses pour effectuer la conception de l'onduleur, dont une tension de bus DC constante. Il serait intéressant de reproduire les essais du chapitre 3 et 4 en modélisant adéquatement le contrôle du bus DC afin de s'assurer que la dynamique observée est complète. De plus, il pourrait être intéressant de concevoir différents algorithmes de contrôle pour l'onduleur, afin de vérifier si un contrôle différent permettrait à l'onduleur d'obtenir une meilleure performance en présence de réseau faible que celui présenté dans ce mémoire.

De plus, il serait aussi intéressant d'explorer davantage l'aspect intelligence artificielle dans le domaine de la production décentralisée. L'IA utilisée au chapitre 5 permet de représenter d'estimer l'impédance de façon adéquate. Un plus grand échantillon de données pourraient être générés afin d'améliorer les performances du MLP en cas d'injection de puissance réactive. De plus, un des aspects de l'IA non discuté est axé sur le contrôle de plusieurs onduleurs en parallèle. Dans les cas évalués au chapitre 4 comprenant 2 onduleurs sur un même transformateur de distribution, on constate qu'un des deux onduleurs ajuste sa consigne pour inclure du courant  $I_q$ , soit du courant réactif pour ramener la tension dans la plage acceptée selon IEE (2018). Il pourrait arriver que certains onduleurs injectent seulement de la puissance active tandis que d'autres ont un partage entre la puissance active et réactive injectée au réseau. Cette situation serait possible lorsque le réseau aurait besoin seulement de l'injection d'une petite quantité de puissance réactive pour revenir dans l'état où la puissance active injectée peut être maximale. Cette situation n'est pas souhaitable, car beaucoup de propriétaires de réseaux de distribution, comme Hydro-Québec, ne paient pas pour la puissance réactive injectée au réseau. Cette situation peut donc mener à une inégalité monétaire pour les propriétaires d'onduleurs monophasés en termes de revenus s'ils sont sur le même transformateur, et ce pour la seule raison du contrôle. Il serait intéressant d'évaluer la possibilité d'une IA qui ferait la gestion des consignes de courant actif et réactif des onduleurs sur un même transformateur à partir de plusieurs intrants, soit l'historique de production, de disponibilités des onduleurs, des prévisions d'ensoleillement,

etc. Cela permettrait d'obtenir une répartition équitable des producteurs tout en maintenant des conditions de réseau acceptable.

## ANNEXE I

### COURBES D'ESSAIS DE L'ONDULEUR OPTIMISÉ

Cette annexe sert de démonstration que le modèle optimisé au chapitre 3 avec la résistance  $r_c$  de  $0,5\Omega$  ainsi que les gains  $k_p$  et  $k_i$  de la PLL ajustés. Les paramètres sont illustrés dans le tableau I-1. Les figures des essais sont aussi illustrées aux figures I-1 à I-5.

Tableau-A I-1 Gain de la PLL,  $r_c = 0.5\Omega$

Paramètres	Valeur
Résistance $r_c$	0,5 $\Omega$
Gain proportionnel $k_p$	0,370
Gain intégral $k_i$	11,3778

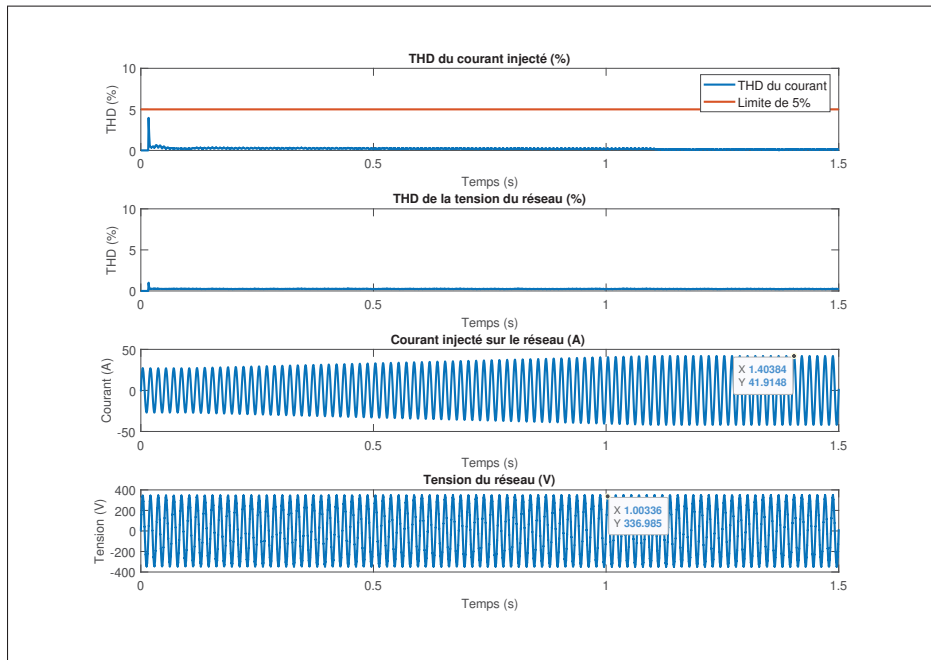


Figure-A I-1 Rampe positive de courant de 15 A pour les essais de l'onduleur de puissance nominale 10 kVA

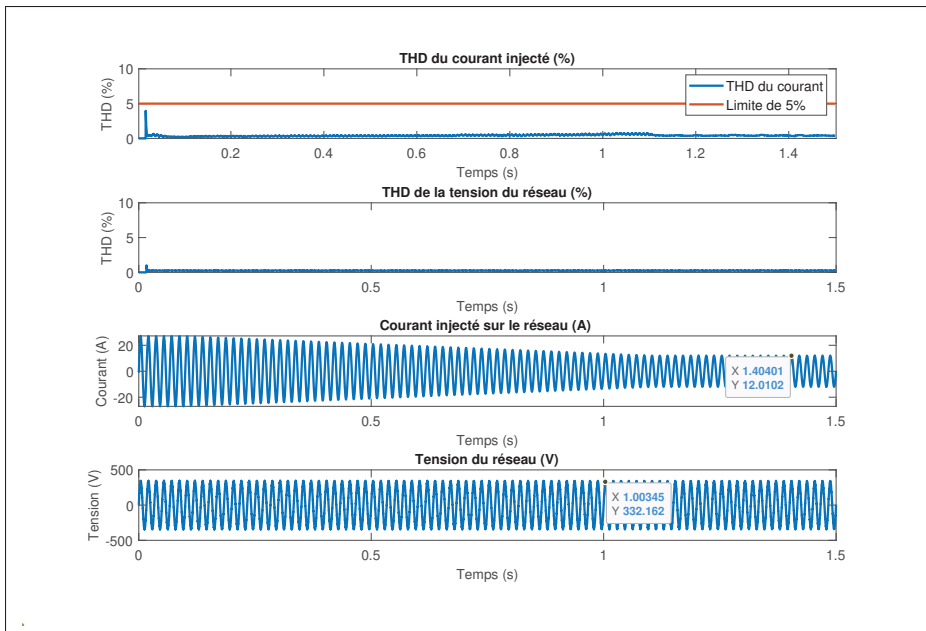


Figure-A I-2 Rampe négative de courant de 15 A pour les essais de l'onduleur de puissance nominale 10 kVA

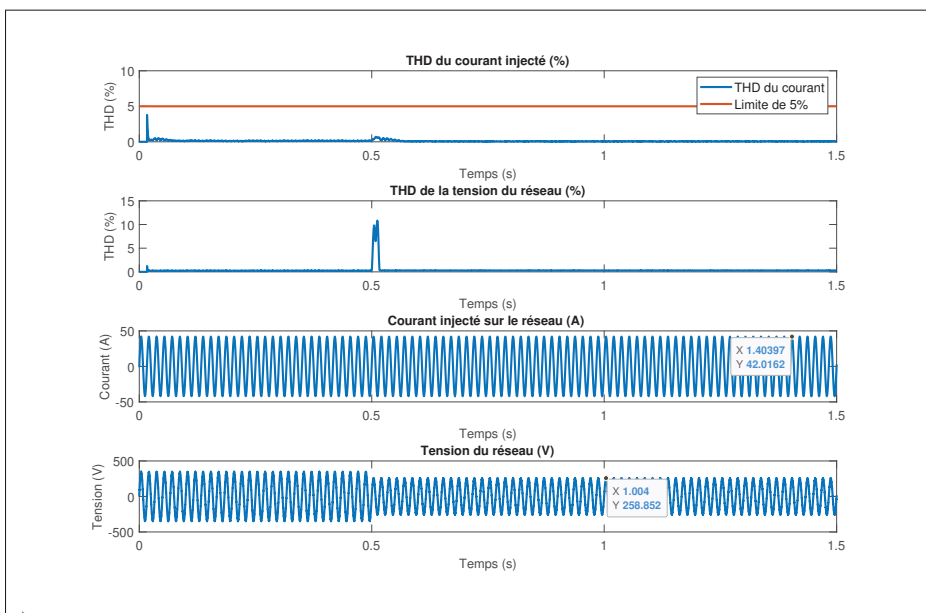


Figure-A I-3 Échelon négatif de tension de 90 V crête pour les essais de l'onduleur de puissance nominale 10 kVA



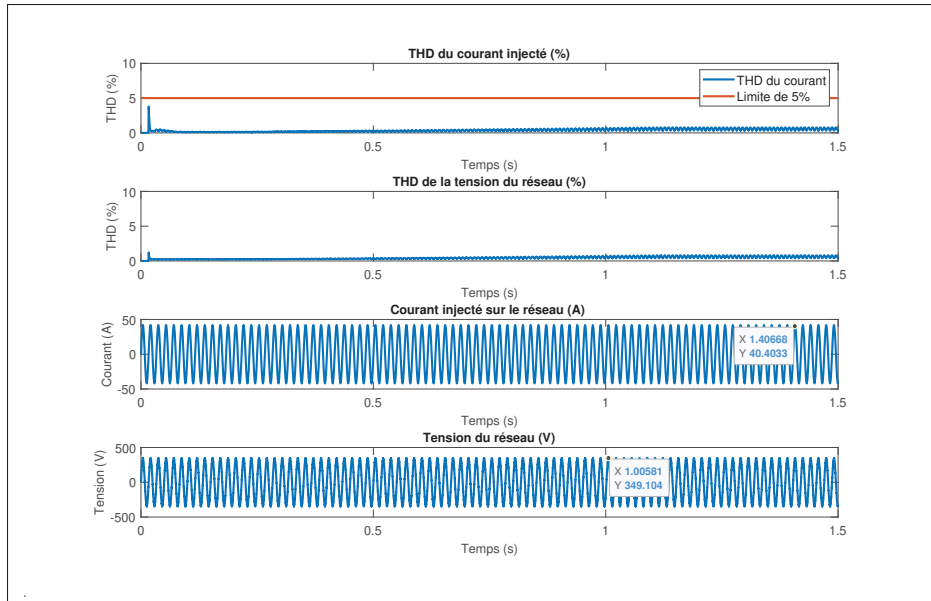


Figure-A I-4 Échelon positif de fréquence de 0.5 Hz de fréquence sur le réseau pour les essais de l'onduleur de puissance nominale 10 kVA

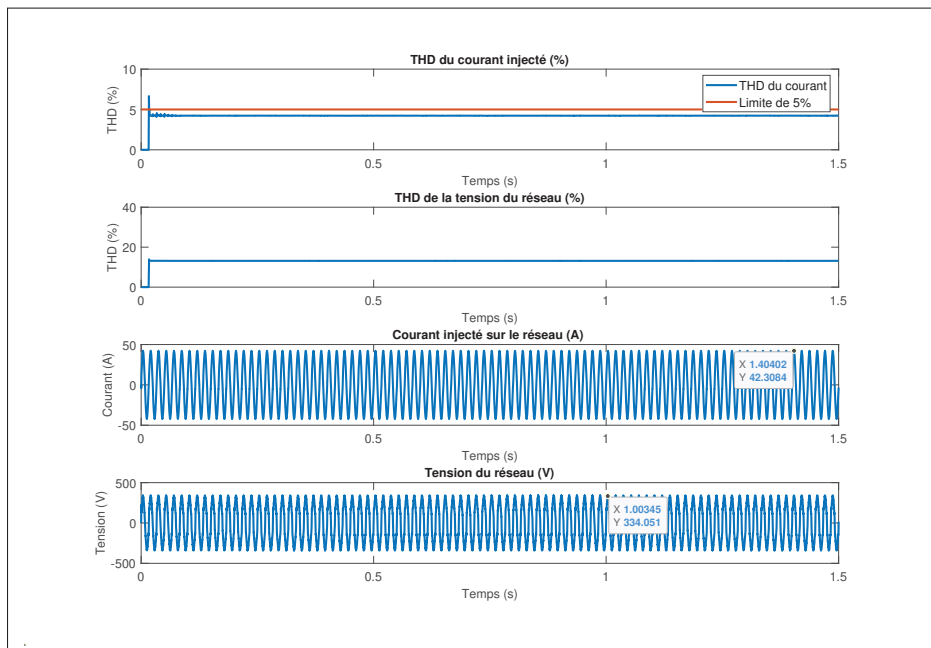


Figure-A I-5 Essai d'injection de courant de l'onduleur de puissance nominale 10 kVA sur un réseau pollué



## ANNEXE II

### CODE MATLAB DU CONTRÔLE VOLT/VAR

Ce code matlab représente le contrôle Volt/Var implémenté dans les onduleurs et les STATCOMs.

```
function [Ip,Iq,InvState] = StateMachine_droop_VoltVar_120(TensionGrid, In, Previous_InvState)
% Contrôle Volt/Var de l'onduleur
% Machine à état respectant la IEEE 1547
Vn = 120;
Vref = 120;
VL = Vn*0.88;
VH = Vn*1.10;
V1 = Vref-0.08*Vn;
V2 = Vref-0.02*Vn;
V3 = Vref+0.02*Vn;
V4 = Vref+0.08*Vn;
S = 10e03;
Ip = In;
Iq = 0;
facteurQ1 = 0.44;
facteurQ2 = 0.0;
facteurQ3 = 0.0;
facteurQ4 = -0.44;

%formule pente courbe case 2
m2 = (facteurQ1-facteurQ2)/(V1-V2);
b2 = facteurQ1/m2/V1;
facteurQpente2 = TensionGrid/Vn*m2+b2;

% formule pente courbe case 4
m4 = (facteurQ3-facteurQ4)/(V3-V4);
b4 = facteurQ3/m4/V3;
facteurQpente4 = TensionGrid/Vn*m4+b4;

% Hystérésis pour régulation de tension
Hysteresis = 0.01;

if TensionGrid > VL && TensionGrid < V1
    if (Previous_InvState == 6 || Previous_InvState == 2) && (TensionGrid <= VL+VL*Hysteresis || TensionGrid >= V1 - V1*Hysteresis)
        InvState = Previous_InvState;
    else
        InvState = 1;
    end

elseif TensionGrid > V1 && TensionGrid < V2
    if (Previous_InvState == 1 || Previous_InvState == 3) && (TensionGrid <= V1+V1*Hysteresis || TensionGrid >= V2 - V2*Hysteresis)
        InvState = Previous_InvState;
    else
        InvState = 2;
    end

end
```

Figure-A II-1 Code Matlab pour le contrôle Volt/Var de l'onduleur, page 1

```

elseif TensionGrid >= V2 && TensionGrid <= V3
    if (Previous_InvState == 2 || Previous_InvState == 4) && (TensionGrid <=
V2+V2*Hysteresis || TensionGrid >= V3 - V3*Hysteresis)
        InvState = Previous_InvState;
    else
        InvState = 3;
    end

elseif TensionGrid > V3 && TensionGrid < V4
    if (Previous_InvState == 3 || Previous_InvState == 5) && (TensionGrid <=
V3+V3*Hysteresis || TensionGrid >= V4 - V4*Hysteresis)
        InvState = Previous_InvState;
    else
        InvState = 4;
    end

elseif TensionGrid >= V4 && TensionGrid < VH
    if (Previous_InvState == 4 || Previous_InvState == 5) && (TensionGrid <=
V4+V4*Hysteresis || TensionGrid >= VH - VH*Hysteresis)
        InvState = Previous_InvState;
    else
        InvState = 5;
    end

elseif TensionGrid <= VL || TensionGrid >= VH

    InvState = 6;

else
    InvState = Previous_InvState;
end

switch(InvState)

case 1
    Ip = sqrt(In^2*(1-facteurQ1));
    Iq = sqrt(In^2*facteurQ1);

case 2
    Ip = sqrt(In^2*(1-abs(facteurQpente2)));
    Iq = -1*sqrt(In^2*abs(facteurQpente2));

case 3
    Ip = sqrt(In^2*(1-facteurQ3));

```

Figure-A II-2 Code Matlab pour le contrôle Volt/Var de l'onduleur, page 2

```
        Iq = sqrt(In^2*facteurQ3);  
    case 4  
        Ip = sqrt(In^2*(1-abs(facteurQpente4)));  
        Iq = sqrt(In^2*abs(facteurQpente4));  
    case 5  
        Ip = sqrt(In^2*(1-abs(facteurQ4)));  
        Iq = sqrt(In^2*abs(facteurQ4));  
    case 6  
        Ip = 0.0;  
        Iq = 0.0;  
  
end
```

Figure-A II-3 Code Matlab pour le contrôle Volt/Var de l'onduleur, page 3



### ANNEXE III

#### SOMMAIRE DES PRÉDICTIONS DE L'ONDULEUR 120V LORS D'INJECTION DE PUISSANCE ACTIVE

Cette annexe illustre les résultats de prédictions du MLP entraîné à partir des variations de tension causées par une injection de puissance active. Les simulations ont été réalisées avec l'onduleur branché sur le 120 V.

Tableau-A III-1 Prédications de l'onduleur 120V lors d'injection de puissance active

Valeur attendue (mH)	Valeur estimée (mH)	Écart (mH)
1,10	1,15	0,05
1,10	1,11	0,01
1,10	1,07	-0,03
1,20	1,25	0,05
1,20	1,23	0,03
1,20	1,13	-0,07
1,30	1,35	0,05
1,30	1,38	0,08
1,30	1,20	-0,1
1,40	1,45	0,05
1,40	1,52	0,12
1,40	1,26	-0,14
1,50	1,55	0,05
1,50	1,62	0,12
1,50	1,33	-0,17
1,60	1,65	0,05
1,60	1,72	0,12

1,60	1,42	-0,18
1,70	1,75	0,05
1,70	1,82	0,12
1,70	1,56	-0,14
1,80	1,85	0,05
1,80	1,91	0,11
1,80	1,70	-0,10
1,90	1,95	0,05
1,90	1,99	0,09
1,90	1,84	-0,06
2,00	2,05	0,05
2,00	2,07	0,07
2,00	1,97	-0,03
3,10	3,00	-0,10
3,10	3,08	-0,02
3,10	3,18	0,08
3,20	3,05	-0,15
3,20	3,17	-0,03
3,20	3,29	0,09
3,30	3,10	-0,20
3,30	3,25	-0,05
3,30	3,39	0,09
3,40	3,14	-0,26
3,40	3,34	-0,06
3,40	3,50	0,10
3,50	3,19	-0,31
3,50	3,43	-0,07
3,50	3,61	0,11



3,60	3,23	-0,37
3,60	3,51	-0,09
3,60	3,71	0,11
3,70	3,28	-0,42
3,70	3,60	-0,10
3,70	3,81	0,11
3,80	3,32	-0,48
3,80	3,68	-0,12
3,80	3,91	0,11
3,90	3,37	-0,53
3,90	3,76	-0,14
3,90	4,01	0,11
4,00	3,41	-0,59
4,00	3,85	-0,15
4,00	4,10	0,10



## ANNEXE IV

### DONNÉES DES SIMULATIONS DE L'ONDULEUR 120V INJECTANT DE LA PUISSANCE ACTIVE POUR ENTRAÎNER LE MLP

Cette annexe présente les données utilisées pour entraîner le MLP pour les prédictions de l'annexe III. Il contient les données d'impédance du réseau, de la différence de tension observée suite à l'injection de courant, du courant actif  $I_p$  et  $I_q$  injecté sur le réseau et finalement l'angle du phaseur de la tension du réseau.

Tableau-A IV-1 Données ayant servi à entraîner l'onduleur 120V lors d'injection de puissance active

Inductance (mH)	Différence de tension (V)	$I_p$ (A)	$I_q$ (A)	Angle (°)
0,10	2,46	14,00	0,00	1,86
0,10	4,73	28,00	0,00	3,71
0,10	6,83	42,00	0,00	5,57
0,20	3,29	14,00	0,00	2,10
0,20	6,34	28,00	0,00	4,21
0,20	9,17	42,00	0,00	6,33
0,30	4,11	14,00	0,00	2,35
0,30	7,94	28,00	0,00	4,71
0,30	11,47	42,00	0,00	7,08
0,40	4,93	14,00	0,00	2,60
0,40	9,52	28,00	0,00	5,21
0,40	13,75	42,00	0,00	7,83
0,50	5,76	14,00	0,00	2,85
0,50	11,09	28,00	0,00	5,72
0,50	15,99	42,00	0,00	8,59
0,60	6,57	14,00	0,00	3,10
0,60	12,64	28,00	0,00	6,22

0,60	18,21	42,00	0,00	9,35
0,70	7,39	14,00	0,00	3,35
0,70	14,19	28,00	0,00	6,72
0,70	20,40	42,00	0,00	10,11
0,80	8,20	14,00	0,00	3,60
0,80	15,72	28,00	0,00	7,22
0,80	22,55	42,00	0,00	10,87
0,90	9,01	14,00	0,00	3,85
0,90	17,24	28,00	0,00	7,72
0,90	24,68	42,00	0,00	11,63
1,00	9,81	14,00	0,00	4,10
1,00	18,74	28,00	0,00	8,23
1,00	26,78	42,00	0,00	12,39
1,10	10,61	14,00	0,00	4,35
1,10	20,24	28,00	0,00	8,73
1,10	28,85	42,00	0,00	13,16
1,20	11,41	14,00	0,00	4,60
1,20	21,72	28,00	0,00	9,24
1,20	30,88	42,00	0,00	13,93
1,30	12,21	14,00	0,00	4,85
1,30	23,18	28,00	0,00	9,74
1,30	32,89	42,00	0,00	14,7
1,40	13,00	14,00	0,00	5,10
1,40	24,64	28,00	0,00	10,25
1,40	34,86	42,00	0,00	15,47
1,50	13,79	14,00	0,00	5,35
1,50	26,08	28,00	0,00	10,75
1,50	36,81	42,00	0,00	16,25

1,60	14,58	14,00	0,00	5,60
1,60	27,51	28,00	0,00	11,26
1,60	38,72	42,00	0,00	17,03
1,70	15,36	14,00	0,00	5,85
1,70	28,92	28,00	0,00	11,77
1,70	40,60	42,00	0,00	17,81
1,80	16,14	14,00	0,00	6,10
1,80	30,32	28,00	0,00	12,28
1,80	42,44	42,00	0,00	18,60
1,90	16,92	14,00	0,00	6,35
1,90	31,71	28,00	0,00	12,79
1,90	44,25	42,00	0,00	19,39
2,00	17,69	14,00	0,00	6,60
2,00	33,09	28,00	0,00	13,30
2,00	46,03	42,00	0,00	20,18
2,10	18,46	14,00	0,00	6,85
2,10	34,45	28,00	0,00	13,81
2,10	47,78	42,00	0,00	20,98
2,20	19,23	14,00	0,00	7,10
2,20	35,80	28,00	0,00	14,32
2,20	49,49	42,00	0,00	21,78
2,30	20,00	14,00	0,00	7,36
2,30	37,13	28,00	0,00	14,84
2,30	51,16	42,00	0,00	22,59
2,40	20,76	14,00	0,00	7,61
2,40	38,45	28,00	0,00	15,35
2,40	52,8	42,00	0,00	23,40
2,50	21,52	14,00	0,00	7,86

2,50	39,76	28,00	0,00	15,87
2,50	54,40	42,00	0,00	24,21
2,60	22,28	14,00	0,00	8,11
2,60	41,05	28,00	0,00	16,38
2,60	55,97	42,00	0,00	25,03
2,70	23,03	14,00	0,00	8,36
2,70	42,33	28,00	0,00	16,9
2,70	57,49	42,00	0,00	25,86
2,80	23,78	14,00	0,00	8,61
2,80	43,59	28,00	0,00	17,42
2,80	58,98	42,00	0,00	26,69
2,90	24,53	14,00	0,00	8,86
2,90	44,84	28,00	0,00	17,94
2,90	60,43	42,00	0,00	27,53
3,00	25,27	14,00	0,00	9,11
3,00	46,08	28,00	0,00	18,47
3,00	61,84	42,00	0,00	28,37
3,10	26,01	14,00	0,00	9,36
3,10	47,30	28,00	0,00	18,99
3,10	63,20	42,00	0,00	29,22
3,20	26,75	14,00	0,00	9,62
3,20	48,51	28,00	0,00	19,52
3,20	64,52	42,00	0,00	30,08
3,30	27,48	14,00	0,00	9,87
3,30	49,70	28,00	0,00	20,05
3,30	65,80	42,00	0,00	30,94
3,40	28,22	14,00	0,00	10,12
3,40	50,88	28,00	0,00	20,57

3,40	67,03	42,00	0,00	31,81
3,50	28,94	14,00	0,00	10,37
3,50	52,04	28,00	0,00	21,11
3,50	68,22	42,00	0,00	32,69
3,60	29,67	14,00	0,00	10,62
3,60	53,19	28,00	0,00	21,64
3,60	69,36	42,00	0,00	33,58
3,70	30,39	14,00	0,00	10,88
3,70	54,32	28,00	0,00	22,17
3,70	70,45	42,00	0,00	34,48
3,80	31,11	14,00	0,00	11,13
3,80	55,43	28,00	0,00	22,71
3,80	71,49	42,00	0,00	35,39
3,90	31,83	14,00	0,00	11,38
3,90	56,53	28,00	0,00	23,25
3,90	72,47	42,00	0,00	36,31
4,00	32,54	14,00	0,00	11,64
4,00	57,61	28,00	0,00	23,79
4,00	73,40	42,00	0,00	37,24





## **ANNEXE V**

### **CODE PYTHON AFIN DE RÉALISER LE MLP**

Cette annexe illustre le code informatique dans le langage de programmation Python utilisé pour générer le MLP. Il contient le script de préparation des données, du MLP lui-même ainsi que la librairie Python créée pour simplifier la présentation du code.

```

# -*- coding: utf-8 -*-
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
from keras.optimizers import RMSprop
from keras.callbacks import EarlyStopping
from sklearn import preprocessing

import pandas as pd
import numpy as np

import Library_Billy
data = pd.read_excel(r"C:/Users/label/AI_STATCOM/STATCOM_120V_Experimental_MLP.xlsx")
data = np.array(data)

# Séparation des données pour l'entraînement et l'évaluation
X_train1 = data[:30,1:4]
X_train2 = data[60:90,1:4]
y_train1 = data[:30,0]
y_train2 = data[60:90,0]

X_test1 = data[30:60,1:4]
y_test1 = data[30:60,0]
X_test2 = data[90:120,1:4]
y_test2 = data[90:120,0]

X_train = np.concatenate((X_train1,X_train2))
y_train = np.concatenate((y_train1,y_train2))
X_test = np.concatenate((X_test1,X_test2))
y_test = np.concatenate((y_test1,y_test2))

# Ajustement des données pour rentrer dans le format de Keras
x_train_scaled = preprocessing.scale(X_train)
scaler = preprocessing.StandardScaler().fit(X_train)

x_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# Déclaration du perceptron
model = Sequential()
model.add(Dense(4096, kernel_initializer = 'normal', activation = 'relu',
input_shape = (3,)))
model.add(Dense(4096, activation = 'relu'))
model.add(Dense(1))

# Compilation du modèle
model.compile(
    loss = 'mse',
    optimizer = RMSprop(),
    metrics = ['mean_absolute_error']
)

# Entraînement du MLP
history = model.fit(
    x_train_scaled, y_train,
    batch_size=160,
    epochs = 20000,

```

Figure-A V-1 Code Python pour créer le MLP, page 1

```
        verbose = 1,
        validation_split = 0.2,
        callbacks = [EarlyStopping(monitor = 'val_loss', patience = 20)]
    )

    # Évaluation du modèle avec les données d'évaluation
    score = model.evaluate(x_test_scaled, y_test, verbose = 0)
    print('Test loss:', score[0])
    print('Test accuracy:', score[1])
    prediction = model.predict(x_test_scaled)
    print(np.round(prediction.flatten(),2))
    print(np.round(y_test,2))

    # Création du graphique de performance du MLP
    Library_Billy.plot_predictions_simple(y_test, prediction)

    print("Test données expérimentales \n")
    valeurstest = [[7.0,0,10],[11.87,0,20], [-6.75,0,-10], [-14.37,0,-20]]
    valeurstest_scaled = scaler.transform(valeurstest)
    #model.predict(valeurstest_scaled)
```

Figure-A V-2 Code Python pour créer le MLP, page 2

```

# -*- coding: utf-8 -*-
import pandas as pd
import Library_Billy as LB
import numpy as np

# Fichier de données contenant les données pour le MLP
path_excel_120 = r"C:/Users/label/Desktop/Documents/Memoire/Inverter10kVA/Experimental/ \
STATCOM_120V_Experimentalp20.xls"

# Rouler avant de faire les modifications manuelles pour les en-têtes
data_f = LB.traitement_excel_MLP(path_excel_120)
writer = pd.ExcelWriter('STATCOM_120V_Experimentalp20_2.xlsx', engine='xlsxwriter')
data_f.to_excel(writer, sheet_name='welcome', index=False)
writer.save()

#Pour obtenir la différence entre les deux régimes permanent de la simulation
data_f = pd.read_excel("STATCOM_120V_Experimentalp10_3.xlsx")
result = []
interval5_10 = []
interval15_20 = []
for step in range(40):
    step +=1
    interval5_10.append(LB.moyenne_interval_MLP(data_f['Vac'+str(step)],data_f['Temps'+str(step)],
        data_f['Ip'+str(step)],
        data_f['Iq'+str(step)],
        data_f['angle'+str(step)],
        0.5,1.0))

    interval15_20.append(LB.moyenne_interval_MLP(data_f['Vac'+str(step)],data_f['Temps'+str(step)],
        data_f['Ip'+str(step)],
        data_f['Iq'+str(step)],
        data_f['angle'+str(step)],
        1.5,2.0))

# Concatenation de deux liste dans un objet pour pouvoir itérer
zip_object = zip(interval5_10, interval15_20)

# Obtenir la différence des deux régimes permanents
for list1_i, list2_i in zip_object:
    result.append(np.array(list1_i) - np.array(list2_i))
interval5_10 = []
interval15_20 = []

data_f = pd.DataFrame(result,columns = ['Vac', 'Ip', 'Iq', 'Angle'])
writer = pd.ExcelWriter('STATCOM_120V_Experimentalp10_4.xlsx', engine='xlsxwriter')
data_f.to_excel(writer, sheet_name='welcome', index=False)
writer.save()

```

Figure-A V-3 Code Python pour prétraiter les données du MLP

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Ce fichier contient la librairie de fonctions utilisées pour le modèle IA de
prédiction d'impédance
"""
import pandas
import matplotlib.pyplot as plt
import tensorflow as tf
import numpy as np

def lire_donnees(fichiercsv):

    fichier = pandas.read_excel(fichiercsv)

    return fichier

def traitement_excel(fichier):

    spreadsheet_file = pandas.ExcelFile(fichier)
    worksheets = spreadsheet_file.sheet_names
    data = pandas.DataFrame()
    data_f = pandas.DataFrame()

    for sheet_name in worksheets:
        data[['Valeur', 'Temps']] = pandas.read_excel(spreadsheet_file, \
                                                    sheet_name, 0)

        data_f = pandas.concat([data_f,data], ignore_index=False, axis = 1)

    print(data_f)
    return data_f

def traitement_excel_MLP(fichier):

    spreadsheet_file = pandas.ExcelFile(fichier)
    worksheets = spreadsheet_file.sheet_names
    data = pandas.DataFrame()
    data_f = pandas.DataFrame()

    for sheet_name in worksheets:
        data[['Temps', 'Vac', 'Ip', 'Iq', 'angle']] = \
            pandas.read_excel(spreadsheet_file, sheet_name, 0)

        data_f = pandas.concat([data_f,data], ignore_index=False, axis = 1)

    return data_f

def traitement_excel_MLP_240samples(fichier):

    spreadsheet_file = pandas.ExcelFile(fichier)
    worksheets = spreadsheet_file.sheet_names
    data = pandas.DataFrame()
    data_f = pandas.DataFrame()

    for sheet_name in worksheets:
        if int(sheet_name) % 2 == 0:
            data[['Temps', 'Vac', 'Ip', 'Iq', 'angle']] = \

```

Figure-A V-4 Librairie Python pour réaliser le MLP et le traitement des données, page 1

```

        pandas.read_excel(spreadsheet_file, sheet_name, 0)

        data_f = pandas.concat([data_f,data], ignore_index=False, axis = 1)

    return data_f

def moyenne_interval(valeur, tarray, tmin, tmax):

    merge = zip(valeur,tarray)
    num = 0
    den = 0
    for val, temps in merge:

        if tmin <= temps <= tmax:
            num += val
            den +=1

    return num/den

def moyenne_interval_MLP(vac, temps, ip, iq, ang, tmin, tmax):

    merge = zip(temps,vac,ip,iq,ang)
    num_vac = 0
    num_ip= 0
    num_iq = 0
    num_ang = 0
    nb_sample = 0

    for temps, vac, ip, iq, ang in merge:

        if tmin <= temps <= tmax:
            num_vac += vac
            num_ip += ip
            num_iq += iq
            num_ang += ang

            nb_sample +=1

    return [num_vac/nb_sample, num_ip/nb_sample, num_iq/nb_sample, num_ang/nb_sample]

def plot_predictions(train_data,
                    train_labels,
                    test_data,
                    test_labels,
                    predictions):

    plt.figure(figsize=(10, 7))

    plt.scatter(train_data, train_labels, c="b", label="Entraînement")

    plt.scatter(test_data, test_labels, c="g", label="Validation")

    plt.scatter(test_labels, predictions, c="r", label="Predictions")

    plt.legend();

```

Figure-A V-5 Librairie Python pour réaliser le MLP et le traitement des données, page 2

```
def mae(y_test, y_pred):  
    return tf.metrics.mean_absolute_error(y_test,  
                                          y_pred)  
  
def mse(y_test, y_pred):  
    return tf.metrics.mean_squared_error(y_test,  
                                         y_pred)  
  
def plot_predictions_simple(  
    test_labels,  
    predictions):  
  
    plt.figure(figsize=(10, 7))  
  
    plt.scatter(np.arange(1,len(test_labels)+1,1),test_labels/10, c="b", label="Référence")  
    plt.scatter(np.arange(1,len(predictions)+1,1),predictions/10, c="r", label="Predictions")  
    plt.title("Performance de la prédiction du MLP")  
    plt.xlabel("Numéro de l'échantillon")  
    plt.ylabel("Valeur de l'inductance (H)")  
  
    plt.legend();
```

Figure-A V-6 Librairie Python pour réaliser le MLP et le traitement des données, page 3





## ANNEXE VI

### DONNÉES UTILISÉES POUR ENTRAÎNER LE MLP SERVANT À PRÉDIRE L'IMPÉDANCE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Cette annexe illustre les différentes données utilisées afin d'entraîner le MLP pour prédire l'impédance à partir de résultats expérimentaux.

Tableau-A VI-1 Données ayant servi à entraîner l'onduleur 120V lors d'un fonctionnement en STATCOM

<b>Inductance (mH)</b>	<b>Différence de tension (V)</b>	<b><math>I_p</math> (A)</b>	<b><math>I_q</math> (A)</b>	<b>Angle (°)</b>
0,10	0,66	0,00	-17,43	-0,01
0,10	0,33	0,00	-8,71	0,00
0,10	-0,57	0,00	15,00	0,00
0,10	-0,29	0,00	7,50	0,00
0,20	1,32	0,00	-17,43	-0,01
0,20	0,66	0,00	-8,71	-0,01
0,20	-1,14	0,00	15,00	0,01
0,20	-0,57	0,00	7,50	0,00
0,30	1,99	0,00	-17,43	-0,02
0,30	0,99	0,00	-8,71	-0,01
0,30	-1,71	0,00	15,00	0,01
0,30	-0,86	0,00	7,50	0,01
0,40	2,65	0,00	-17,43	-0,02
0,40	1,32	0,00	-8,71	-0,01
0,40	-2,29	0,00	15,00	0,02
0,40	-1,14	0,00	7,50	0,01
0,50	3,31	0,00	-17,43	-0,03
0,50	1,66	0,00	-8,71	-0,01
0,50	-2,86	0,00	15,00	0,02

0,50	-1,43	0,00	7,50	0,01
0,60	3,97	0,00	-17,43	-0,03
0,60	1,99	0,00	-8,71	-0,02
0,60	-3,43	0,00	15,00	0,03
0,60	-1,71	0,00	7,50	0,01
0,70	4,64	0,00	-17,43	-0,04
0,70	2,32	0,00	-8,71	-0,02
0,70	-4,00	0,00	15,00	0,03
0,70	-2,00	0,00	7,50	0,02
0,80	5,30	0,00	-17,43	-0,04
0,80	2,65	0,00	-8,71	-0,02
0,80	-4,57	0,00	15,00	0,04
0,80	-2,29	0,00	7,50	0,02
0,90	5,96	0,00	-17,43	-0,05
0,90	2,98	0,00	-8,71	-0,02
0,90	-5,14	0,00	15,00	0,04
0,90	-2,57	0,00	7,50	0,02
1,00	6,62	0,00	-17,43	-0,05
1,00	3,31	0,00	-8,71	-0,03
1,00	-5,72	0,00	15,00	0,04
1,00	-2,86	0,00	7,50	0,02
1,10	7,29	0,00	-17,43	-0,06
1,10	3,64	0,00	-8,71	-0,03
1,10	-6,29	0,00	15,00	0,05
1,10	-3,14	0,00	7,50	0,02
1,20	7,95	0,00	-17,43	-0,06
1,20	3,97	0,00	-8,71	-0,03
1,20	-6,86	0,00	15,00	0,05

1,20	-3,43	0,00	7,50	0,03
1,30	8,61	0,00	-17,43	-0,07
1,30	4,31	0,00	-8,71	-0,03
1,30	-7,43	0,00	15,00	0,06
1,30	-3,72	0,00	7,50	0,03
1,40	9,27	0,00	-17,43	-0,08
1,40	4,64	0,00	-8,71	-0,04
1,40	-8,00	0,00	15,00	0,06
1,40	-4,00	0,00	7,50	0,03
1,50	9,93	0,00	-17,43	-0,08
1,50	4,97	0,00	-8,71	-0,04
1,50	-8,57	0,00	15,00	0,07
1,50	-4,29	0,00	7,50	0,03
1,60	10,60	0,00	-17,43	-0,09
1,60	5,30	0,00	-8,71	-0,04
1,60	-9,15	0,00	15,00	0,07
1,60	-4,57	0,00	7,50	0,04
1,70	11,26	0,00	-17,43	-0,09
1,70	5,63	0,00	-8,71	-0,05
1,70	-9,72	0,00	15,00	0,08
1,70	-4,86	0,00	7,50	0,04
1,80	11,92	0,00	-17,43	-0,10
1,80	5,96	0,00	-8,71	-0,05
1,80	-10,29	0,00	15,00	0,08
1,80	-5,14	0,00	7,50	0,04
1,90	12,58	0,00	-17,43	-0,10
1,90	6,29	0,00	-8,71	-0,05
1,90	-10,86	0,00	15,00	0,08

1,90	-5,43	0,00	7,50	0,04
2,00	13,25	0,00	-17,43	-0,11
2,00	6,62	0,00	-8,71	-0,05
2,00	-11,43	0,00	15,00	0,09
2,00	-5,72	0,00	7,50	0,04
2,10	13,91	0,00	-17,43	-0,11
2,10	6,95	0,00	-8,71	-0,06
2,10	-12,00	0,00	15,00	0,09
2,10	-6,00	0,00	7,50	0,05
2,20	14,57	0,00	-17,43	-0,12
2,20	7,29	0,00	-8,71	-0,06
2,20	-12,58	0,00	15,00	0,10
2,20	-6,29	0,00	7,50	0,05
2,30	15,23	0,00	-17,43	-0,12
2,30	7,62	0,00	-8,71	-0,06
2,30	-13,15	0,00	15,00	0,10
2,30	-6,57	0,00	7,50	0,05
2,40	15,90	0,00	-17,43	-0,13
2,40	7,95	0,00	-8,71	-0,06
2,40	-13,72	0,00	15,00	0,11
2,40	-6,86	0,00	7,50	0,05
2,50	16,56	0,00	-17,43	-0,13
2,50	8,28	0,00	-8,71	-0,07
2,50	-14,29	0,00	15,00	0,11
2,50	-7,15	0,00	7,50	0,06
2,60	17,22	0,00	-17,43	-0,14
2,60	8,61	0,00	-8,71	-0,07
2,60	-14,86	0,00	15,00	0,12

2,60	-7,43	0,00	7,50	0,06
2,70	17,88	0,00	-17,43	-0,14
2,70	8,94	0,00	-8,71	-0,07
2,70	-15,43	0,00	15,00	0,12
2,70	-7,72	0,00	7,50	0,06
2,80	18,55	0,00	-17,43	-0,15
2,80	9,27	0,00	-8,71	-0,08
2,80	-16,00	0,00	15,00	0,12
2,80	-8,00	0,00	7,50	0,06
2,90	19,21	0,00	-17,43	-0,16
2,90	9,60	0,00	-8,71	-0,08
2,90	-16,58	0,00	15,00	0,13
2,90	-8,29	0,00	7,50	0,06
3,00	19,87	0,00	-17,43	-0,16
3,00	9,93	0,00	-8,71	-0,08
3,00	-17,15	0,00	15,00	0,13
3,00	-8,57	0,00	7,50	0,07
3,10	20,53	0,00	-17,43	-0,17
3,10	10,27	0,00	-8,71	-0,08
3,10	-17,72	0,00	15,00	0,14
3,10	-8,86	0,00	7,50	0,07
3,20	21,19	0,00	-17,43	-0,17
3,20	10,60	0,00	-8,71	-0,09
3,20	-18,29	0,00	15,00	0,14
3,20	-9,15	0,00	7,50	0,07
3,30	21,86	0,00	-17,43	-0,18
3,30	10,93	0,00	-8,71	-0,09
3,30	-18,86	0,00	15,00	0,15

3,30	-9,43	0,00	7,50	0,07
3,40	22,52	0,00	-17,43	-0,18
3,40	11,26	0,00	-8,71	-0,09
3,40	-19,43	0,00	15,00	0,15
3,40	-9,72	0,00	7,50	0,08
3,50	23,18	0,00	-17,43	-0,19
3,50	11,59	0,00	-8,71	-0,09
3,50	-20,01	0,00	15,00	0,16
3,50	-10,00	0,00	7,50	0,08
3,60	23,84	0,00	-17,43	-0,19
3,60	11,92	0,00	-8,71	-0,10
3,60	-20,58	0,00	15,00	0,16
3,60	-10,29	0,00	7,50	0,08
3,70	24,51	0,00	-17,43	-0,20
3,70	12,25	0,00	-8,71	-0,10
3,70	-21,15	0,00	15,00	0,17
3,70	-10,57	0,00	7,50	0,08
3,80	25,17	0,00	-17,43	-0,20
3,80	12,58	0,00	-8,71	-0,10
3,80	-21,72	0,00	15,00	0,17
3,80	-10,86	0,00	7,50	0,08
3,90	25,83	0,00	-17,43	-0,21
3,90	12,92	0,00	-8,71	-0,10
3,90	-22,29	0,00	15,00	0,17
3,90	-11,15	0,00	7,50	0,09
4,00	26,49	0,00	-17,43	-0,21
4,00	13,25	0,00	-8,71	-0,11
4,00	-22,86	0,00	15,00	0,18

4,00	-11,43	0,00	7,50	0,09
------	--------	------	------	------





## ANNEXE VII

### RÉSULTATS DES PRÉDICTIONS DE L'ONDULEUR 120V LORS D'UN FONCTIONNEMENT EN STATCOM

La présente annexe présente les résultats bruts des prédictions de l'onduleur 120V lors de son fonctionnement en STATCOM.

Tableau-A VII-1 Prédications de l'onduleur 120V lors d'un fonctionnement en STATCOM

<b>Valeur attendue (mH)</b>	<b>Valeur estimée (mH)</b>	<b>Écart (mH)</b>
0,80	0,88	0,08
0,80	0,90	0,10
0,90	1,05	0,15
0,90	1,04	0,14
0,90	0,99	0,09
0,90	1,02	0,12
1,00	1,16	0,16
1,00	1,16	0,16
1,00	1,10	0,10
1,00	1,14	0,14
1,10	1,27	0,17
1,10	1,28	0,18
1,10	1,23	0,13
1,10	1,26	0,16
1,20	1,39	0,19
1,20	1,40	0,20
1,20	1,35	0,15
1,20	1,37	0,17

1,30	1,50	0,20
1,30	1,51	0,21
1,30	1,48	0,18
1,30	1,48	0,18
1,40	1,61	0,21
1,40	1,62	0,22
1,40	1,61	0,21
1,40	1,59	0,19
1,50	1,73	0,23
1,50	1,72	0,22
1,50	1,73	0,23
1,50	1,69	0,19
2,30	2,44	0,14
2,30	2,09	-0,21
2,40	2,70	0,30
2,40	2,33	-0,07
2,40	2,51	0,11
2,40	2,11	-0,29
2,50	2,81	0,31
2,50	2,36	-0,14
2,50	2,58	0,08
2,50	2,13	-0,37
2,60	2,91	0,31
2,60	2,39	-0,21
2,60	2,64	0,04
2,60	2,15	-0,45
2,70	3,00	0,30
2,70	2,42	-0,28

2,70	2,70	0,00
2,70	2,16	-0,54
2,80	3,10	0,30
2,80	2,45	-0,35
2,80	2,76	-0,04
2,80	2,18	-0,62
2,90	3,18	0,28
2,90	2,48	-0,42
2,90	2,83	-0,07
2,90	2,19	-0,71
3,00	3,27	0,27
3,00	2,50	-0,50
3,00	2,89	-0,11
3,00	2,21	-0,79



## BIBLIOGRAPHIE

- Brill, R. & Tynan, C. (2023, September). Do Solar Panels Increase Your Home's Value? *Forbes HOME*, pp. 1.
- Bruyant-Rozoy, C. (2019). *Conception de la commande et analyse de stabilité d'un onduleur photovoltaïque connecté au réseau de distribution*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal).
- Duncan, J., Sarma, M. & Overbye, T. (2008). *Power System Analysis and Design* (éd. 4). Stamford, USA : CENGAGE Learning.
- EDF. (2023). Types of renewable energy [Page web]. Repéré à <https://www.edfenergy.com/energywise/renewable-energy-sources>.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A. (2016). *Deep Learning* (éd. 1). Cambridge, USA : MIT Press.
- Huang, J. (2020). RMSProp. Repéré le 2020-12-20 à <https://optimization.cbe.cornell.edu/index.php?title=RMSProp>.
- IEEE. (2018). *IEEE Standards for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. IEEE1547-2018. 3 Park Avenue New York USA : IEEE.
- Krishnamurthy, B. (2022). An Introduction to the ReLU Activation Function [Article]. Repéré à <https://builtin.com/machine-learning/relu-activation-function>.
- NERC. (2017). *Integrating InverterBased Resources into Low Short Circuit Strength Systems* (Rapport n°1). Atlanta, USA : NERC.
- NERC. (2018). *Short-Circuit Modeling and System Strength* (Rapport n°1). Atlanta, USA : NERC.
- NERC. (2021). *Odessa Disturbance* (Rapport n°1). Atlanta, USA : NERC.
- NERC. (2022). *2022 Odessa Disturbance* (Rapport n°1). Atlanta, USA : NERC.
- O.Tremblay, D.Rimorov, J.-F.Haché, D.Guérette & R.Gagnon. (2022, Août). *A Power Hardware-in-the-Loop Infrastructure for DER Integration*. Conférence présentée à CIGRÉ Session 2022.

- Ruan, X., Wang, X., Pan, D., Yang, D., Li, W. & Bao, C. (2018). *Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters* (éd. 1). Beijing, China : Science Press Beijing.
- Sarraf, A. & Frigaard, I. (2021). SlurryNet : Predicting Critical Velocities and Frictional Pressure Drops in Oilfield Suspension Flows. *energies*, 1263(14).
- WECC. (2018). April and May 2018 inverter events [Présentation]. Repéré à [https://www.nerc.com/comm/PC/InverterBased%20Resource%20Performance%20Task%20Force%20IRPT/Inverter\\_Based\\_Resource\\_Performance\\_Task\\_Force\\_Meeting\\_Presentations\\_August\\_14-15\\_2018\\_Folsom\\_CA.pdf](https://www.nerc.com/comm/PC/InverterBased%20Resource%20Performance%20Task%20Force%20IRPT/Inverter_Based_Resource_Performance_Task_Force_Meeting_Presentations_August_14-15_2018_Folsom_CA.pdf).
- Y.Xu & Goodacre, R. (2018). On Splitting Training and Validation Set : A Comparative Study of Cross-Validation, Bootstrap and Systematic Sampling for Estimating the Generalization Performance of Supervised Learning [Article]. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6373628/>.
- Zmood, D. N. & Holmes, D. G. (1999, Juillet). *Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error*. Record présentée à 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Charleston, SC, USA (pp. 814-822).