

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الآلية و الكهروتقني
Département d'Automatique & Électrotechnique



Mémoire De Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Présenté par :

Chamma Abdallah

&

Benabid Abderrahim

Modélisation Et Conception D'un Contrôleur Interne Pour Les Onduleurs Triphasés Dans un Micro-Réseau

PROMOTEUR : Dr. Bradai Rafik

CO-PROMOTEUR : Mlle. Ait Hammouda Camelia

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Nous devons tout d'abord remercier **ALLAH** notre créateur, de nous avoir donné la santé et la force pour accomplir ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudee à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont endurés.

Aux membres du jury

Nos remerciements vont aussi au président de jury et aux examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

A notre Promoteur Mr Bradai Rafik

On a eu l'honneur d'être parmi vos élèves et de bénéficier de votre riche enseignement. Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour nous un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscité notre admiration. Veuillez bien monsieur recevoir nos remerciements pour le grand honneur d'avoir accepté l'encadrement de ce travail.

A notre Co-Promoteur Mlle Ait Hammouda Camelia

Votre compétence, judicieux conseils, votre encadrement ont toujours suscité notre profond respect. Nous vous remercions pour votre accueil et vos conseils. Veuillez trouver ici, l'expression de notre gratitude et de notre grande estime.

Nous voudrions remercier chaleureusement, tous nos proches et tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir ce Travail

Dédicaces

A ma très chère **Mère**

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher **Père**

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon très cher **frère** MOHAMMED et mes sœurs SOUHILA et NESRINE et à mes **poussins** MERIEM, ANES, RYM et LINA

A mes très chers **amis frères** BADR, ABDELLMOUMEN, FEDAA, AYOUB et ABDELLWAHAB

A ma très chère SARA

A mon cher **frère binôme** BENABID ABDERRAHIM et sa famille.

Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite

ABDALLAH CHAMMA

J'ai l'honneur de dédier ce travail à mes chers parents, pour leur aide et leurs soutient continuel.

Ma mère, la lumière des yeux et source de ma volonté.

Mon père qui a sacrifié tout pour je puisse étudier.

A mon frère et mes sœurs.

A tout ma famille.

A mes copains et copines.

A tout personne qui ma connait et m'aimé surtout ma promotion (2^{ème} année Master).

BENABID ABDERRAHIM

Résumé :

Récemment l'utilisation des énergies renouvelables a connu une véritable croissance. Poussé par les objectifs climatiques et des avantages économiques, plusieurs pays dans le monde ont accru leurs ambitions. Face à cette nouvelle tendance énergétique, un nouveau concept est apparu : les micro-réseaux (Microgrids MG) qui sont devenus de plus en plus populaires compte tenu de leur efficacité, fiabilité et flexibilité. Ils représentent une solution viable pour combiner les petits systèmes de production basés sur des ressources énergétiques renouvelables distribuées (RED) afin d'améliorer les services de production d'électricité publics traditionnels.

Afin de connecter les RED au réseau de distribution et/ou aux charges locales, les onduleurs à source de tension avec une configuration de filtre LC sont désormais largement utilisés. Pour garantir leur fonctionnement stable, ainsi que le bon suivi de la référence de tension de sortie un contrôleur interne à double boucle est souvent introduit dans la portée de contrôle primaire. Cependant, pour analyser la stabilité du système et sélectionner correctement les paramètres du contrôleur interne, la modélisation des boucles internes du contrôle primaire, l'analyse et la conception du contrôle sont étudiés dans ce travail.

Mots clé : Micro-réseaux, contrôleur interne, onduleur triphasé, filtre LC, régulateur PI, Modélisation et conception.

الملخص:

في الآونة الأخيرة، كانت هناك زيادة حقيقية في استخدام الطاقات المتجددة. نظرا للأهداف المناخية والفوائد الاقتصادية، تتزايد طموحات العديد من البلدان حول العالم في هذا المجال. استجابة لهذا الاتجاه الجديد للطاقة، ظهر مفهوم جديد: الشبكات الصغيرة (Microgrids MG)، التي أصبحت شائعة بشكل متزايد نظراً لكفاءتها وموثوقيتها ومرونتها.. وهي تمثل حلاً قابلاً للتطبيق لدمج أنظمة التوليد الصغيرة القائمة على الطاقة المتجددة الموزعة (RED) لتحسين خدمات توليد الكهرباء التقليدية.

من أجل ربط أنظمة التوليد بشبكة التوزيع و/أو الأحمال المحلية، يتم الآن استخدام محولات الجهد مع مرشح LC على نطاق واسع. لضمان التشغيل المستقر بالإضافة إلى الرصد السليم لمراجع جهد الخرج، غالباً ما يتم إدخال وحدة تحكم داخلية ثنائية الحلقة في نطاق التحكم الأولي. ومع ذلك، من أجل تحليل استقرار النظام واختيار عوامل وحدة التحكم الداخلية بشكل صحيح، تم دراسة نمذجة الحلقات الداخلية للتحكم الأولي وتحليل وتصميم التحكم في هذا العمل.

الكلمات الرئيسية: الشبكات الصغيرة، وحدة التحكم الداخلية، عاكس ثلاثي الأطوار، مرشح LC ، وحدة تحكم PI ، النمذجة والتصميم.

Abstract:

Recently, the use of renewable energies has been on the rise. Driven by climate objectives and economic benefits, many countries around the world have increased their ambitions. In response to this new energy trend, a new concept has emerged: Microgrids (MG), which have become increasingly popular for their efficiency, reliability and flexibility. They represent a viable solution for combining small generation systems based on distributed renewable energy resources (DER) to enhance traditional public power generation services.

In order to connect DERs to the distribution grid and/or to local loads, voltage source inverters with an LC filter configuration are now widely used. To guarantee their stable operation, as well as proper tracking of the output voltage reference, a dual-loop inner controller is often introduced into the primary control scope. However, to analyze system stability and correctly select inner controller parameters, primary control loops' modeling, analysis and control design are investigated in this work.

Keywords: Microgrid, inner controller, three-phase inverter, LC filter, PI controller, Modeling and design.

Table Des Matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles et Abréviations	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités Sur Les Micro-Réseaux	
1.1 Introduction	4
1.2 Définition du micro-réseau.....	4
1.3 L'utilisation du micro-réseau.....	5
1.4 Caractéristiques attendues du micro-réseau	6
1.4.1 Autonomie.....	6
1.4.2 Stabilité	6
1.4.3 Evolutivité.....	6
1.4.4 Efficacité.....	7
1.4.5 Economie	7
1.5 La structure du micro-réseau	7
1.6 Type de micro-réseau	8
1.6.1 Micro-réseau AC.....	8
1.6.2 Micro-réseau DC.....	9
1.6.3 Micro-réseau hybride	9
1.7 Principe du contrôle d'un micro-réseau.....	10
1.7.1 Structure de contrôle centralisée	10
1.7.2 Structure de contrôle décentralisée	11
1.7.3 Contrôle hiérarchique du micro-réseau.....	11
1.7.3.1 Contrôle primaire	12
1.7.3.2 Contrôle secondaire.....	12
1.7.3.3 Contrôle tertiaire	13
1.8 Aspect environnemental	13
1.9 Les avantages et les défis des micro-réseaux	13
1.10 Conclusion.....	14

Table Des Matières

Chapitre 2 : Les Convertisseurs DC/AC

2.1 Introduction	16
2.2 Définition de l'onduleur	16
2.3 Applications.....	16
2.4 Constitution d'onduleur.....	17
2.4.1 Partie puissance.....	17
2.4.2 Partie commande.....	18
2.5 Onduleur Triphasé	19
2.5.1 Structure de l'onduleur de tension triphasé	19
2.5.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé	20
2.6 La commande MLI	20
2.6.1 Caractéristiques de la modulation.....	21
2.7 Les avantages de la commande MLI	22
2.8 Simulation.....	22
2.8.1 Interprétation des résultats	24
2.9 Le filtre LC	24
2.9.1 Définition	24
2.9.2 L'utilisation du filtre	24
2.9.3 Le rôle du filtre	25
2.10 Les résultat de simulation avec et après l'utilisation du filtre	25
2.11 Interprétation des résultats	27
2.12 Conclusion	27

Chapitre 3 : Modélisation Et Conception

3.1 Introduction	29
3.2 Contrôleur interne pour les onduleurs triphasés	29
3.2.1 Contrôleur de partage de puissance	30
3.2.2 Contrôleur interne à double boucle.....	30
3.3 Modélisation et conception des boucles de commande interne dans le repère dq	31
3.3.1 Modélisation d'un onduleur triphasé suivi du filtre LC en repère dq.....	31
3.3.2 Stratégie de contrôle de tension et de courant et les formulations mathématiques	33
3.3.3 Réglage des paramètres de contrôle.....	35
3.4 Conclusion	37

Table Des Matières

Chapitre 4 : Simulation, Résultats Et Discussions

4.1 Introduction	39
4.2 Description du système.....	39
4.3 Simulation.....	41
4.3.1 Le premier cas : L'augmentation de la demande en puissance.....	42
4.3.2 Le deuxième cas : L'alimentation d'une charge non-linière	43
4.3.3 Le troisième cas : Fréquence variable.....	44
4.3.4 Le quatrième cas : Amplitude variable	45
4.5 Conclusion.....	45
Conclusion générale	46
Annexes	
bibliographies	

Liste Des Figures

Figure 1.1	Exemple d'une structure de micro-réseau.....	6
Figure 1.2	Structure typique d'un micro-réseau.....	8
Figure 1.3	Micro-réseau alimenté en AC.....	9
Figure 1.4	Micro-réseau alimenté en DC.....	9
Figure 1.5	Micro-réseau hybride.....	10
Figure 1.6	Structure générale du contrôle hiérarchique.....	12
Figure 2.1	Schéma de principe de l'onduleur.....	16
Figure 2.2	Schéma de principe PUSH-PULL.....	17
Figure 2.3	Schéma de principe d'onduleur en demi-pont.....	17
Figure 2.4	Schéma de principe d'onduleur en pont.....	18
Figure 2.5	Onduleur de tension a un créneau par alternance (déséquilibré).....	19
Figure 2.6	Onduleur de tension triphasé a un créneau par alternance (équilibré).....	20
Figure 2.7	Schéma synoptique de la MLI.....	21
Figure 2.8	Simulation de commande MLI d'onduleur avec filtre LC.....	22
Figure 2.9	Schéma de l'onduleur MLI.....	22
Figure 2.10	Schéma de la commande de l'onduleur MLI.....	23
Figure 2.11	Résultat simulation onduleur MLI.....	23
Figure 2.12	Circuit de filtre LC.....	25
Figure 2.13	Tension simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge résistive.....	25
Figure 2.14	Courant simple de sortie avant et après le filtrage une charge résistive.....	26
Figure 2.15	Tension simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge inductive.....	26
Figure 2.16	Courant simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge inductive.....	27
Figure 3.1	Schéma de principe de la commande primaire basée sur le contrôleur interne pour un onduleur triphasé connecté a un bus AC.....	30
Figure 3.2	Circuit de filtre LC.....	32
Figure 3.3	Schéma fonctionnel du modèle d'onduleur-filtre LC en repère dq.....	33
Figure 3.4	Schéma fonctionnel du modèle d'onduleur filtré en LC dans le repère dq avec le contrôleur interne.....	35
Figure 4.1	Schéma bloc du système étudié.....	39
Figure 4.2	Schéma bloc du l'onduleur	39

Liste Des Figures

Figure 4.3	Schéma bloc du control primaire.....	40
Figure 4.4	La simulation sous les conditions standards.....	41
Figure 4.5	La simulation avec une deuxième charge linière.....	42
Figure 4.6	La simulation avec une charge non-linière.....	43
Figure 4.7	La simulation avec une augmentation de fréquence.....	44
Figure 4.8	La simulation avec une diminution de la tension.....	45

Liste Des Tableaux

Tableau 4.1	Les paramètres de la simulation.....	40
--------------------	--------------------------------------	----

Liste Des Abréviations Et Symboles

Liste Des Abréviations

AC	Alternative Current (Courant Alternatif)
DC	Direct Current (Courant Continu)
DES	Distributed Energy Sources (Sources d'énergie distribuées)
EMS	Energy Management System (système de gestion de l'énergie)
MG	Micro-Grid "Micro-Réseau"
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion
VSI	Voltage Source Inverter

Liste Des Abréviations Et Symboles

Liste Des Symboles

$v_{L.abc}$	La tension de l'inductance dans le repère abc
$v_{r.abc}$	La tension de la résistance dans le repère abc
$v_{C.abc}$	La tension de condensateur dans le repère abc
$v_{inv.abc}$	La tension de l'alimentation dans le repère abc
L_1	La bobine de première ligne
r_1	La résistance de première ligne
$i_{L1.abc}$	Le courant de la première bobine dans le repère abc
$i_{L2.abc}$	Le courant de la deuxième bobine dans le repère abc
$i_{c.abc}$	Le courant de condensateur dans le repère abc
$\overline{i}_{L1.abc}$	Le courant de référence de première bobine dans le repère abc
$\overline{i}_{L1.dq}$	Le courant de référence de première bobine dans le repère dq
$\overline{v}_{C.abc}$	La tension de référence de condensateur dans le repère abc
$\overline{v}_{C.dq}$	La tension de référence de condensateur dans le repère dq
$\overline{v}_{inv.dq}$	La tension de référence de l'alimentation dans le repère dq
$\overline{i}_{L2.dq}$	Le courant de référence de la deuxième bobine dans le repère dq
$i_{L1.d}$	Le courant de la première bobine dans le repère d
$i_{L1.q}$	Le courant de la première bobine dans le repère q
$v_{C.dq}$	La tension de condensateur dans le repère dq
i_{L2d}	Le courant de la deuxième bobine dans le repère d
i_{L2q}	Le courant de la deuxième bobine dans le repère q
v_{inv}	Le courant de l'alimentation
K_p	Gain proportionnel
K_i	Gain intégral
a, b, c	Les grandeurs réelles

Liste Des Abréviations Et Symboles

d, q	Les grandeurs de Park (d : directe, q : transversale)
L	Inducteur de filtre
C	Condensateur de filtre
ϑ_x	L'angle de tension
ω_x	La vitesse de pulsation

Introduction Générale

Introduction Générale

En raison de l'évolution des modes de vie intelligents et du développement rapide à notre époque, ainsi que de la prise de conscience croissante de l'environnement et de la diminution des ressources en combustibles fossiles, il existe une demande croissante en énergie propre et verte. C'est ainsi que l'énergie renouvelable a émergé, offrant une alternative qui permet de réduire la consommation d'énergie fossile en exploitant des ressources naturelles sans risque pour l'environnement, telles que l'énergie photovoltaïque, éolienne et hydraulique. Dans ce contexte, l'étude des énergies renouvelables est devenue une stratégie essentielle pour les êtres humains.

Cependant, malgré les avantages de l'énergie renouvelable, la forte croissance de la demande énergétique dépasse souvent la capacité des sources d'énergie renouvelable à y répondre. Cela a conduit à la recherche de moyens plus efficaces pour utiliser ces ressources. Ainsi, les chercheurs ont développé une solution prometteuse connue sous le nom de micro-réseau.

Les micro-réseaux offrent diverses utilisations sur site, notamment la réduction des pertes d'énergie liées à la distance entre la centrale et les consommateurs. Ils sont également utilisés pour faire face aux pannes du réseau principal et à la production intermittente provenant des sources d'énergie renouvelable (SER). Pour alimenter des charges alternatives à partir d'une source d'énergie continue, un convertisseur DC/AC (onduleur) est nécessaire pour convertir l'énergie de courant continu en courant alternatif, rendant ainsi l'énergie compatible avec les charges.

Plusieurs types de contrôle sont trouvés dans la littérature : centralisée [1], décentralisée [2] et le contrôle hiérarchique [3], qui contient trois niveaux, primaire, secondaire et tertiaire. Néanmoins, le contrôle des micro-réseaux pose plusieurs défis, tels que la synchronisation et l'interconnexion de différents convertisseurs de puissance, ainsi que l'incertitude des changements de charge (linéaire et non linéaire).

L'objectif principal de ce travail est de bâtir une plateforme de connaissance autour des micro-réseaux et leurs types de contrôles afin de faire face à quelques défis mentionnés. Pour cela, nous sommes concentrer spécifiquement sur le micro-réseau alternatif (AC), et en conséquent les convertisseurs DC/AC et leur contrôle, et plus particulièrement sur le contrôle primaire, en mettant l'accent sur la boucle interne qui est un élément crucial du contrôle hiérarchique du micro-réseau.

Introduction Générale

En plus d'une introduction et une conclusion générale, qui contient une synthèse des travaux réalisés et les principaux résultats obtenus, le présent travail est subdivisé en quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude générale du micro-réseau. Nous y présenterons la structure globale du micro-réseau ainsi que les principes de contrôle, en tenant compte du contrôle hiérarchique utilisé dans notre travail.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude de la structure générale de l'onduleur. Étant donné que nous travaillons avec ce type de convertisseur, nous aborderons les différentes techniques de commande, en mettant l'accent sur la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), ainsi qu'une brève description du filtre LC utilisé. Nous présenterons également les résultats de simulations sur MATLAB, montrant les performances du convertisseur avec et sans l'utilisation du filtre.

Le troisième chapitre aborde les notions de contrôle interne sur lesquelles nous travaillons. Nous y présenterons la modélisation et la conception des boucles de contrôle interne (boucle de courant et boucle de tension), et définir vers la fin leurs caractéristiques pour une utilisation ultérieure.

Afin de valider l'efficacité du contrôleur étudié en troisième chapitre, le quatrième chapitre présente la simulation globale du système, sous MATLAB/Simulink, comprenant le convertisseur et son contrôle, et en présence des charges linéaires et non linéaires. Des scénarios variés sont appliqués pour simuler différentes conditions de charge.

Chapitre 1

Généralités sur les micro-réseaux

1.1 Introduction

En raison des nombreux problèmes auxquels le réseau est actuellement confronté (augmentation de la consommation, pénurie de pétrole, réchauffement climatique ainsi que pollution de l'environnement, faible efficacité énergétique, etc.), une nouvelle tendance de production s'est développée, appelée production distribuée. Cette production utilise des sources d'énergie renouvelables (non conventionnelles) telles que le biogaz, les cellules photovoltaïques, les parcs éoliens, etc. Celles-ci sont considérées comme des sources d'énergie propres, c'est-à-dire que ces méthodes de production ont des émissions de CO₂ quasi nulles. Malheureusement, l'utilisation de la génération distribuée peut causer autant de problèmes qu'elle n'en résout. Une façon de mieux exploiter le potentiel énergétique de la production décentralisée est d'employer une approche qui permet un contrôle local des générateurs et aussi des consommateurs dans le sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être appelés micro-réseau.

Fondamentalement, un micro-réseau est défini comme un réseau intelligent ou une partie d'un réseau intelligent. Ce micro-réseau comprend des consommateurs, des micro-sources basées sur les énergies renouvelables et des systèmes de stockage locaux. Ils peuvent fonctionner sur connexion ou sans aucune entrée d'autres réseaux. Le développement des micro-réseaux est très prometteur pour l'industrie électrique car il offre de nombreux avantages tels que la réduction du réchauffement climatique et de la pollution de l'environnement, une fiabilité, une qualité et une puissance accrues, des pertes réduites et donc une production accrue...

Dans ce chapitre, nous présenterons les micro-réseaux. Dans un premier temps, nous donnerons sa définition ainsi que ses avantages et inconvénients. Ensuite, nous examinerons de plus près le micro-réseau et ses principes de control. [6]

1.2 Définition du micro-réseau

Les micro-réseaux sont des petits réseaux destinés à fournir de l'électricité à un petit nombre de consommateurs (régions, zones industrielles ou artisanales, villages, etc.). Il se compose de multiples charges interconnectées, d'installations de production décentralisées (micro turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, micro éoliennes, petits générateurs hydroélectriques), des installations de consommation, souvent basées sur des ressources énergétiques renouvelables, d'installations de stockage et d'outils de surveillance et de gestion de la demande. Il peut être connecté au réseau principal car il peut

fonctionner indépendamment. La possibilité d'intégrer différents types de générateurs et de ressources énergétiques distribuées, telles que les énergies renouvelables, les systèmes de stockage d'énergie et les micro-turbines, augmente la fiabilité et l'efficacité du système global. [6]

L'objectif principal du développement du réseau électrique est d'atteindre un équilibre entre la production et la consommation en intégrant des systèmes de contrôle et de stockage, ce qui rend le système plus stable.

De plus, les MG permettent de répondre localement aux besoins en électricité des clients. Ils peuvent fournir une alimentation de secours, augmenter la fiabilité locale, réduire les pertes de puissance et fournir une prise en charge de la tension locale. D'un point de vue environnemental, les micro-réseaux réduisent la pollution de l'environnement et le réchauffement climatique en utilisant des technologies à faible émission de carbone. [7]

1.3 L'utilisation du micro-réseau

Les projets de micro-réseaux électriques peuvent être classés selon leur taille, mais aussi selon leur utilité (fiabilité, résilience et efficacité du réseau, difficulté à obtenir de l'énergie, dégradation des conditions météorologiques, émergence de régions écologiques, reflet de multiples sources d'énergie, économie d'énergie, etc.) sont divisés en 4 grandes catégories :

- Micro-réseaux de zones commerciales, artisanales ou industrielles : Ces zones très consommatrices d'électricité regroupent des entreprises et des industries aux activités diverses et aux besoins énergétiques différents. Il s'agit d'optimiser la gestion de l'énergie pour les rendre plus neutres vis-à-vis des réseaux de distribution.
- Micro-réseau du campus universitaire : l'enjeu était d'améliorer la gestion énergétique du campus où la consommation d'énergie devait être réduite.
- Les micro-réseaux fournissent de l'électricité aux zones reculées parce qu'elles ont des connexions au réseau faibles ou inexistantes, ou sont temporairement déconnectées en raison de conditions météorologiques extrêmes : le déploiement des micro-réseaux leur permet d'utiliser du diesel renouvelable coûteux. Les micro-réseaux pourraient également permettre aux villes touchées par des phénomènes météorologiques violents d'éviter les pannes complètes.
- Quartiers écologiques : ils fonctionnent plus ou moins comme des micro-réseaux de quartiers commerciaux ou industriels. [8]

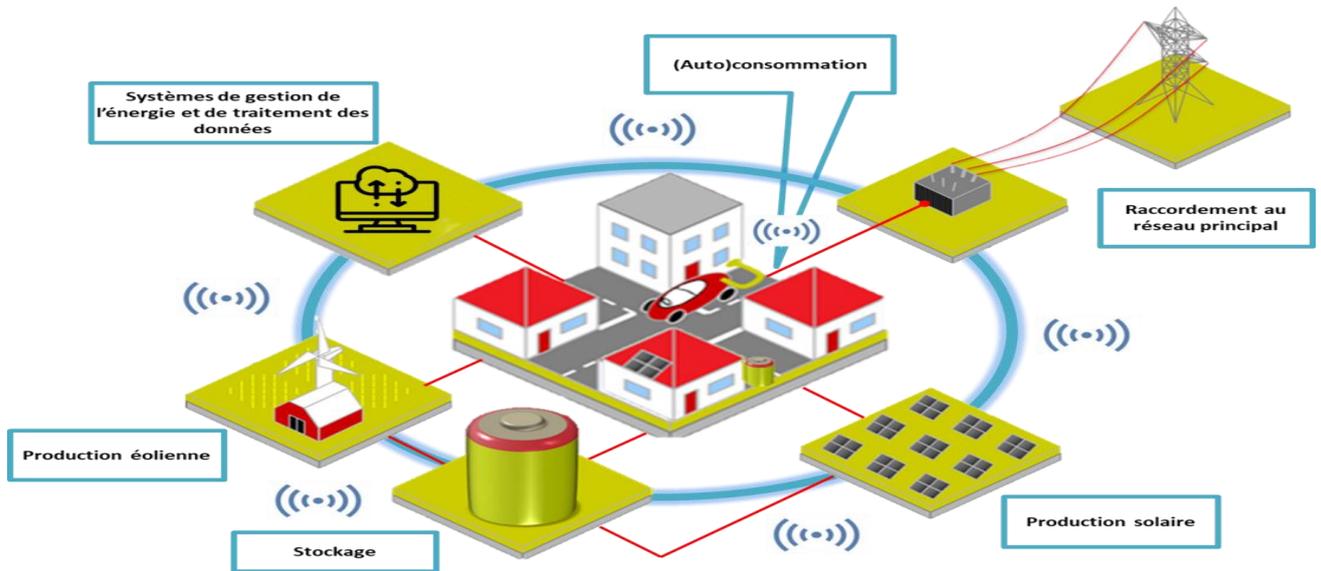


Figure 1.1 : Exemple d'une structure de micro-réseau [21].

1.4 Caractéristiques attendues du micro-réseau

Les MR peuvent être définis selon des caractéristiques en matière de :

1.4.1 Autonomie : les micro-réseaux incluent la production, le stockage et les charges, et peuvent fonctionner en deux modes connectés au réseau et en mode îloté. Dans le premier cas, Il est recommandé que le DER supporte la tension et la fréquence du système pendant un certain temps pendant que les équipements d'interconnexion et de protection prennent le relais pour une transition réussie. En mode îloté, le système est capable d'équilibrer la production et la charge et peut maintenir la tension et la fréquence du système dans des limites définies avec des contrôles adéquats.[3]

1.4.2 Stabilité : le contrôle local indépendant des générateurs, des batteries et des charges des micro-réseaux est basé sur les chutes de fréquence et les niveaux de tension à la borne de chaque appareil. Cela signifie qu'un micro-réseau peut fonctionner de manière stable pendant les conditions de fonctionnement nominales et pendant les événements transitoires, que le plus grand réseau soit en marche ou en panne.

1.4.3 Évolutivité : les micro-réseaux peuvent simplement se développer grâce à l'installation supplémentaire de générateurs, stockage et charges. Une telle extension nécessite généralement une nouvelle planification incrémentielle du micro-réseau et peut être réalisée

de manière parallèle et modulaire afin de passer à des niveaux de production et de consommation d'énergie plus élevés

1.4.4 Efficacité : les structures de contrôleur de supervision de micro-réseaux centralisées et distribuées peuvent optimiser l'utilisation des générateurs, gérer la charge et la décharge des unités de stockage d'énergie et gérer la consommation. de cette manière, les objectifs de gestion de l'énergie peuvent être profondément optimisés, par exemple sur les plans économique et environnemental.[4]

1.4.5 Économie : les techniques de contrôle de la fréquence de retombée permettent de programmer la prise de décision économique dans des protocoles d'exploitation standard.

1.5 La structure du micro-réseau

La structure typique d'un MG est illustrée dans la **Figure 1.2**, dans laquelle le micro-réseau est connecté au réseau électrique principal avec un bus de couplage public (PCC), et se compose de source d'énergies renouvelables distribuées, des convertisseurs de puissance et des systèmes de charges *et* de stockage d'énergie. De plus, comme indiqué, les DG sont connectés en parallèle. Cependant, dans ces réseaux, la complexité globale du système et la difficulté de stabilité du système augmentent considérablement.

Le fonctionnement du micro-réseau nécessite 3 éléments de base comme suivant :

- Des installations locales de production d'énergie pour assurer l'autonomie en cas de déconnexion du réseau public (panneaux photovoltaïques, éoliennes, cogénération, pompes à chaleur, centrales biomasse, hydroliennes), en complément du secours (groupes électrogènes). En théorie, les micro-réseaux peuvent être complètement hors réseau.
- Systèmes de stockage d'énergie : batteries, réservoirs pompés, réservoirs chimiques latents.
- Le système de gestion intelligent assure un équilibre continu entre la production et la demande d'électricité. [5]

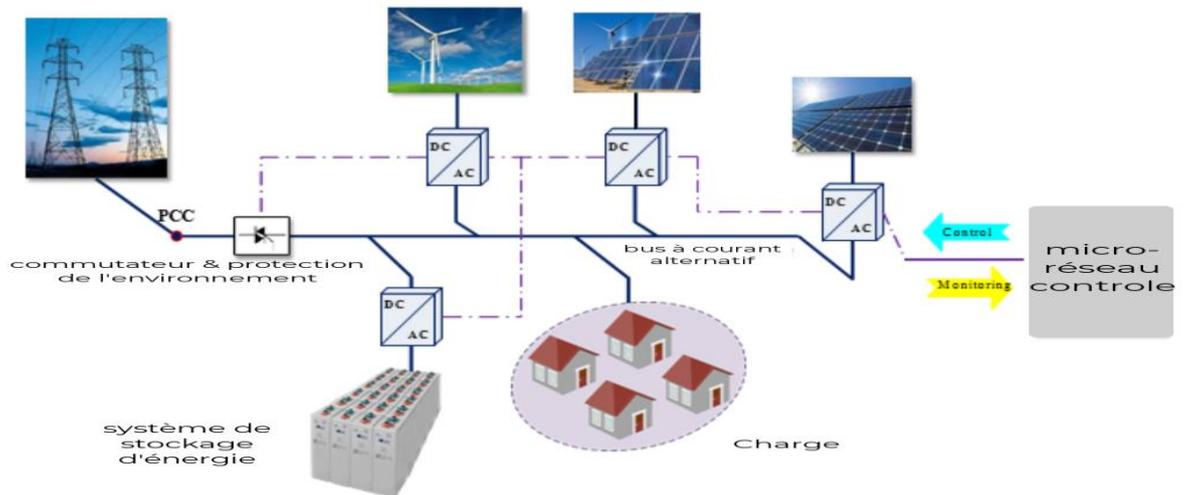


Figure 1.2 : Structure typique d'un micro-réseau AC

1.6 Types de micro-réseau

Généralement, les micro-réseaux peuvent fonctionner en mode *connecté au réseau* ou en mode autonome pour alimenter les charges critiques [9], [10]. En mode connecté au réseau, les unités de génération distribuée alimentent le MG, tandis que le réseau principal détermine la tension et la fréquence du système [11]. Ainsi, les composants MG agissent ensemble au point de couplage commun (PCC) pour injecter/absorber une quantité spécifiée de puissance dans/depus le réseau. En revanche, en fonctionnement îloté, le VSI contrôle de manière autonome la tension et la fréquence du micro-réseau et respecte l'équilibre de puissance active et réactive entre production et demande [12], [13]. Selon la fonction de micro-réseau et le type d'interconnexion avec une tension de PCC, micro-réseau sont dispose comme suit : en micro-réseau AC, micro-réseau DC et hybride.

1.6.1 Micro-réseau AC

Les micro-réseaux AC sont d'avantage pris en compte en raison de leurs défis en contrôles d'amplitude de tension et de fréquence, flux de puissance active et réactive, et la correspondance avec les réseaux de distribution AC actuels, qui peuvent être regroupés en micro-réseau AC et former un nouveau mode micro-réseau opération [14]. Dans une architecture de micro-réseau AC, les générateurs distribués sont connectés à un bus AC commun, Ce type de micro-réseau a principalement deux états stables de fonctionnement, connecté au réseau et fonctionnement îloté. Il a également deux états transitoires, correspondant à la transition entre ces états stationnaires. Pendant ces quatre conditions, le système de micro-réseau doit rester stable et maintenir l'exigence du code de réseau.

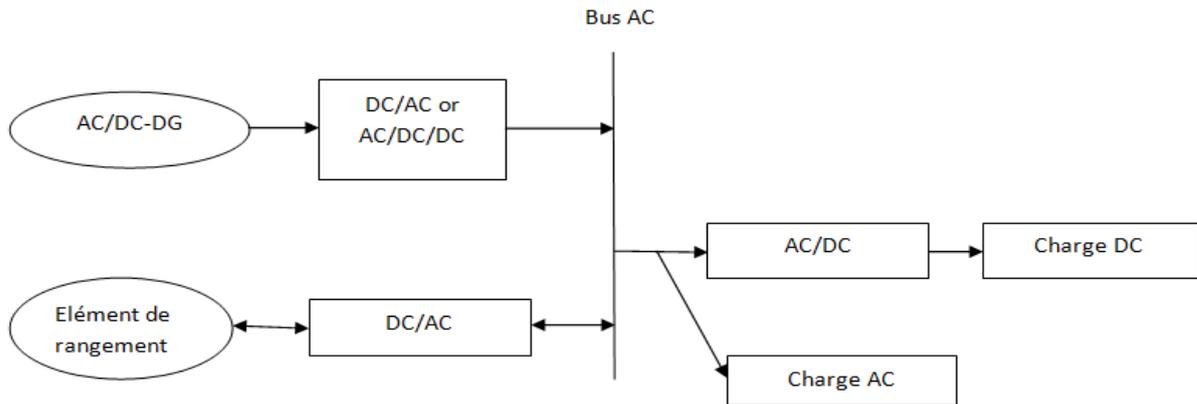


Figure 1.3: Micro-Réseau alimenté en AC

1.6.2 Micro-réseau DC

Il s'agit d'un micro-réseau qui utilise le courant continu comme source d'énergie principale (bus DC). L'énergie générale provient de centrales photovoltaïques, de piles à combustible et certaines centrales électriques utilisent des machines à courant continu (DC) comme systèmes de production. Comme le montre la **Figure 1.4**

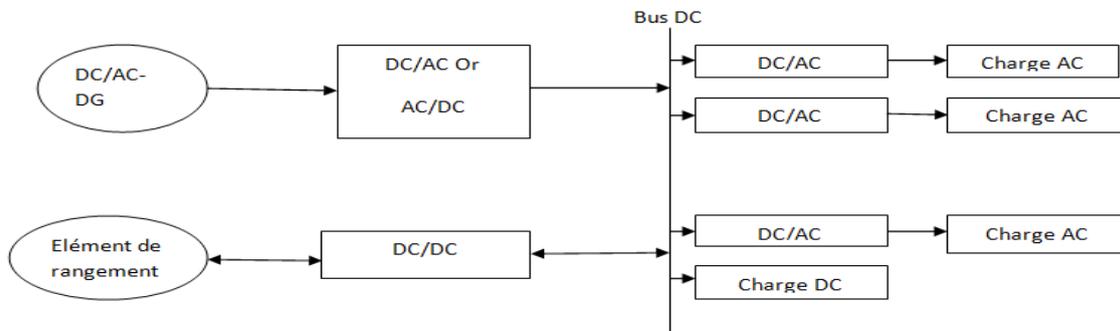


Figure 1.4: micro-réseau alimenté en DC

1.6.3 Micro-réseau hybride

Les micro-réseaux hybrides sont ceux qui combinent au moins deux technologies pour la production d'énergie. En général, on utilise du carburant diesel comme source d'énergie primaire et une source d'énergie renouvelable auxiliaire. Ils sont considérés comme une solution technologique pour la production d'énergie rentable et fiable adaptée à l'approvisionnement de l'électricité pour les services de base.

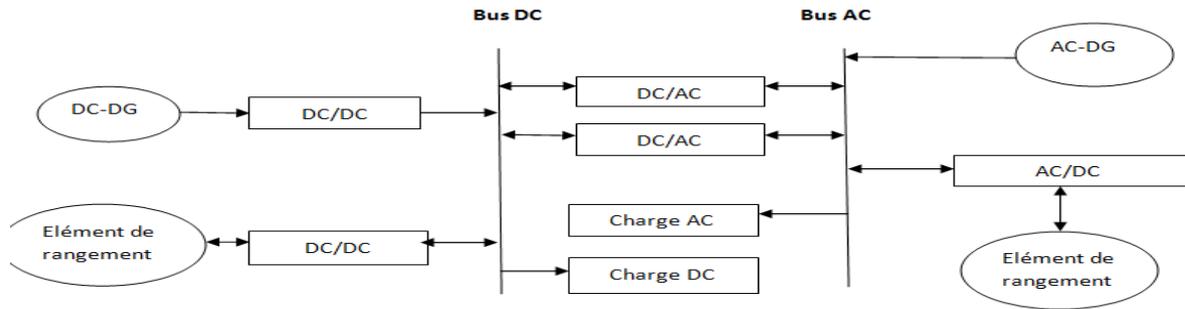


Figure 1.5: Micro-réseau hybride

1.7 Principe du contrôle d'un micro-réseau

Un micro-réseau devrait remplir certaines tâches et certains objectifs tels que la régulation de la fréquence et de la tension des unités de génération distribuée, la qualité de l'énergie, les taux de puissance active et réactive, la restauration du système, la gestion de l'énergie et la synchronisation du réseau pour assurer un fonctionnement sûr et correct du micro-réseau. De plus, étant donné que le MG est capable de fonctionner à la fois connecté (lorsque le commutateur de la **Figure 1.2** est fermé) et déconnecté (lorsque le commutateur est ouvert) du réseau de distribution, des transitions pas très impressionné entre ces modes de fonctionnement sont l'un des objectifs à concevoir. Donc, bien faire les choses est tout un défi.

1.7.1 Structure de contrôle centralisée

Cette structure nécessite que les données et les mesures de tous les micro-réseaux soient communiquées à un contrôleur central, qui décide des actions de contrôle de l'ensemble du système pour maintenir un équilibre de partage de puissance entre les générateurs. Cependant, cette approche n'est pas fiable en raison de la complexité de la passerelle micro-réseau et de la nécessité d'un système de communication à large bande passante pour un partage rapide des informations. Ce contrôle n'est pas possible lorsque les générateurs de micro-réseaux sont répartis sur une large zone et sur de longues distances, car si l'opérateur de contrôle ne peut pas garantir le contrôle pour une raison quelconque, l'ensemble du système peut cesser de fonctionner.

1.7.2 Structure de contrôle décentralisée

Cette structure n'est pas basée sur la communication, elle permet à chaque unité d'être gérée indépendamment par son contrôleur local pour réguler la tension et la fréquence, afin que chaque unité puisse partager les besoins en puissance active et réactive, il n'y a donc pas d'interaction entre les différents contrôleurs de micro-réseau [7]. La méthode est basée sur le

même contrôle de statisme que les générateurs de systèmes conventionnels. L'avantage de ce contrôle est qu'il augmente la fiabilité du micro-réseau, de sorte que toutes les unités sont indépendantes les unes des autres et chaque unité est responsable de son propre contrôle de tension et de fréquence [9]. Cependant, cette méthode n'est pas parfaite et présente certains inconvénients dus à la nature tombante. Il y a aussi l'amplitude de la fréquence et de la tension, qui peuvent chuter et dépasser la plage autorisée, ce qui rend difficile la synchronisation entre les unités de génération distribuée si la distance entre les unités est grande [4]

1.7.3 Contrôle hiérarchique du micro-réseau

Un bon compromis entre les approches entièrement décentralisées et entièrement centralisées est le contrôle hiérarchique. Il est divisé en trois niveaux, primaire, secondaire et tertiaire [17], [19- 20]. Ils diffèrent les uns des autres par leur réactivité et leur fonctionnalité. L'emploi du contrôle hiérarchique permet d'intégrer de manière fiable les ressources énergétiques distribuées décentralisées. La communication par bande passante augmente également la fiabilité et la redondance du système [18]. Dans la **Figure 1.6**, la structure générale du contrôle hiérarchique est présentée, ainsi qu'un bref aperçu de tâches principales pour chaque niveau de contrôle.

Une architecture de contrôle hiérarchique typique est classée en trois niveaux de contrôle comme suit :

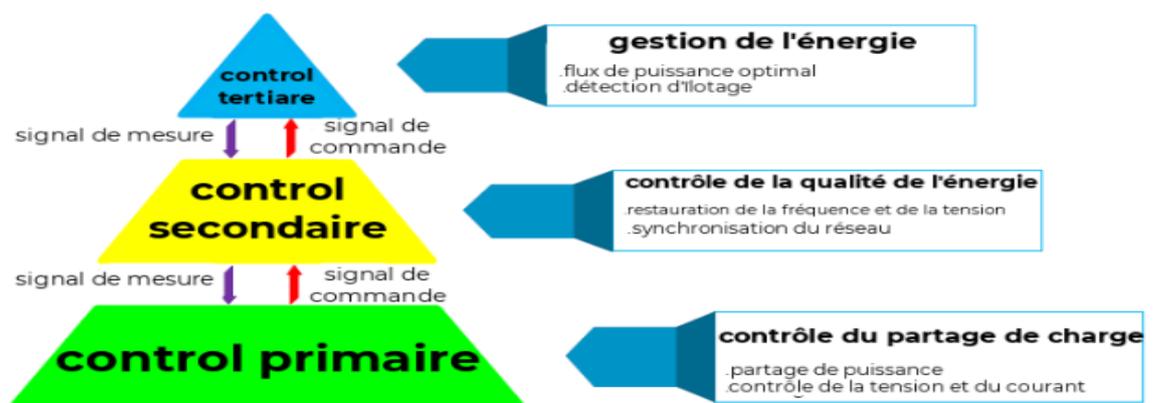


Figure 1.6 : structure générale du contrôle hiérarchique

1.7.3.1 Contrôle primaire

Cette couche de contrôle est responsable du contrôle des ressources énergétiques distribuées (DER), des charges locales partielles et de l'équilibre de la puissance active et réactive. Son objectif principal est de réguler la fréquence et la tension des générateurs distribués afin qu'ils ne s'écartent pas de manière significative des valeurs nominales. Il a généralement une structure décentralisée, tenant compte de la période de temps de calcul, appliquée localement au niveau de chaque source de production décentralisée. Les contrôles primaires reposent également entièrement sur des mesures locales. Quand MG fonctionnant en mode décentralisé, le contrôle primaire peut prendre certaines décisions et générer des instructions pour les niveaux de contrôle interne. Lorsque le contrôle MG est centralisé, le niveau de contrôle principal reçoit des points de consigne du contrôleur central MG.[18]

1.7.3.2 Contrôle secondaire

Le rôle de cette couche de contrôle n'est pas seulement de restaurer l'amplitude de la tension et de la fréquence et de s'assurer qu'elles sont stables dans la plage spécifique au PCC, mais également d'effectuer la gestion de l'énergie via le système de gestion de l'énergie. (Anglais; Energy Management System (EMS), synchronisé avec le réseau principal, le micro-réseau fonctionne de manière économique en mode connecté au réseau et en mode autonome.

Ce niveau de contrôle est plus lent que le contrôle précédemment décrit. Cela permet à la fois d'examiner les principales dynamiques en régime permanent et de disposer de suffisamment de temps pour effectuer des calculs complexes.[18]

1.7.3.3 Contrôle tertiaire

Cette couche de contrôle est le niveau le plus élevé de la hiérarchie de contrôle et est généralement utilisée pour optimiser le flux de puissance entre différents MG ou entre le micro-réseau et le réseau principal. Le contrôle tertiaire facilite la planification en temps réel des opérations de flux d'énergie et la gestion des achats et des ventes d'énergie entre les consommateurs ou entre les MG et le réseau principal. Cela fonctionne généralement en quelques minutes ou quelques heures. Ce niveau de contrôle n'est nécessaire qu'en mode de connexion réseau car il ne fait pas partie de la MG elle-même.

Mais à partir du réseau principal ; lors d'un fonctionnement autonome, la coordination la plus élevée est généralement obtenue par le contrôle secondaire.[18]

1.8 Aspect environnemental

- ❖ Le micro-réseau encourage l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.
- ❖ Les impacts importants sur l'utilisation des terres sont évités.
- ❖ Les émissions de CO₂ sont réduites.
- ❖ La sensibilisation croissante à l'environnement et les directives gouvernementales ont ouvert la voie à une augmentation de la fraction de l'électricité fournie à partir de sources renouvelables.
- ❖ La production d'énergie renouvelable pourrait apparaître dans les micro-réseaux, en particulier ceux interconnectés par des dispositifs électroniques de puissance, tels que les systèmes photovoltaïques ou certaines éoliennes.
- ❖ Les micro-turbines alimentées au biocarburant sont également une possibilité. Sur le plan environnemental, les piles à combustible et la plupart des sources renouvelables constituent une amélioration majeure par rapport aux moteurs à combustion conventionnels.[19],[20]

1.9 Avantages et les défis des micro-réseaux

La forte consommation d'énergie des villes, des industries et des opérations militaires a des besoins différents. Certains ont besoin de systèmes énergétiques flexibles pour protéger leurs communautés en cas d'urgence, tandis que d'autres ont besoin d'optimiser l'énergie, de stimuler la croissance des entreprises ou de protéger les opérations critiques, et tous veulent une énergie plus verte. Quelle que soit la raison, une solution de micro-réseau personnalisable offre des performances optimales pour répondre à une gamme de besoins clés avec ses différents avantages :

- ✓ Assurer d'avoir une bonne qualité d'énergie tout en maintenant la qualité, la stabilité et la sécurité électrique
- ✓ Une puissance suffisante pour répondre à la demande tout en équilibrant l'alimentation du réseau central, la production locale et la gestion de la charge.
- ✓ La proximité entre consommation et production permet d'optimiser les parcours énergétiques pour réduire les pertes.
- ✓ Investissement limité dans les réseaux de transport et de distribution.
- ✓ Réduire la dépendance au réseau central grâce à un système de gestion intelligent.

- ✓ Intégrer les énergies renouvelables sur le réseau pour éviter l'installation de centrales à charbon.
- ✓ Stocker de l'énergie pour l'utiliser en cas de besoin.
- ✓ Garantir la continuité de service par la production locale d'énergie.

Parmi les défis et les difficultés auxquels nous sommes confrontés, on mentionne :

- ❖ Contrôler trois paramètres principaux selon des normes acceptables : la tension, la fréquence et la qualité de l'énergie.
- ❖ Stockage d'énergie électrique nécessitant beaucoup d'espace et de maintenance.
- ❖ Difficile à synchroniser avec le réseau.
- ❖ L'ampleur des mesures de protection est plus difficile par rapport aux réseaux standards.
- ❖ Des normes d'interconnexion doivent être développées pour assurer la cohérence.
- ❖ Résoudre les enjeux des énergies renouvelables (intermittence, localisation des sites de production, fonctionnement bidirectionnel).

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les micro-réseaux qui peuvent fournir une meilleure fiabilité du service électrique avec une meilleure qualité. Différentes définitions et structure de contrôle du Micro-réseau ont été définis. Le contrôle hiérarchique du Micro-réseau a été décrit montrant les différents niveaux de contrôle (primaire, secondaire, tertiaire). Le chapitre suivant est consacré à l'étude de l'onduleur basé sur la commande MLI et suivi d'un filtre LC.

Chapitre 2

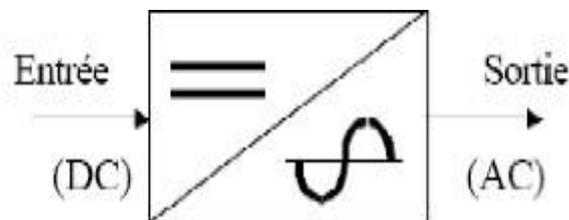
Les convertisseurs DC/AC

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, différents types de micro-réseau ont été mentionnés. Dans ce chapitre, on s'est concentré sur le MG AC, dans lequel des convertisseurs DC/AC représente l'élément clé du système, ils servent à convertir la tension DC des sources en AC pour l'alimentations des charges. Pour cela, la définition des onduleurs, leur applications et techniques de commande sont déterminés, suivis d'une simulation comparative pour montrer l'utilité des filtres LC.

2.2 Définition de l'onduleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui assurent la conversion DC-AC, fournissant de l'énergie en continu, qui modifient périodiquement la connexion entre l'entrée et la sortie, et permettent d'obtenir une alimentation alternative en sortie. Les onduleurs sont principalement utilisés pour fournir de la tension ou du courant alternatif lors de coupures de courant afin d'assurer l'alimentation de charges critiques (micro-ordinateurs, stations de télécommunication, etc.) ou l'alimentation permanente de systèmes autonomes. (Centrales photovoltaïques, machines aérospatiales, etc.) .) [22]



Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)

Figure 2.1 : schéma de principe de l'onduleur

2.3 Applications

- Les alimentations de secours ;
- Les alimentations sans interruption [23] ;
- Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique [24]
- Dans le domaine des véhicules électriques et hybrides, l'onduleur permet de transformer la tension de batterie continue en tension sinusoïdale, admissible par les machines synchrones et asynchrones
- Les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical [25].

2.4 Constitution d'onduleur

2.4.1 Partie puissance

- A. Onduleur avec transformateur à point milieu (PUSH-PULL)
- B. Onduleur avec diviseur capacitif à l'entrée (en demi-point).
- C. Onduleur en pont complet.

A-Onduleur push-pull :

Schéma de principe :

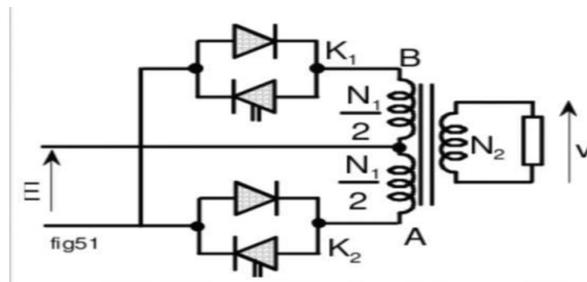


Figure 2.2 : schéma de principe de PUSH-PULL

Principe de fonctionnement :

La logique de cette configuration est que chaque enroulement est alternativement exposé à une tension E . Lorsque le transistor 1 ou la diode 1 est conducteur, le transistor 2 voit une tension égale à $2E$ à ses bornes. Si le rapport de transformation est de 1, la tension alternative apparaissant au secondaire est une tension rectangulaire de valeur $\pm E$.

B-Onduleur en demi-pont:

Schéma de principe :

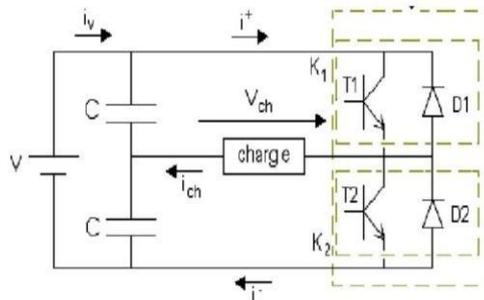


Figure 2.3 : schéma de principe d'onduleur en demi-pont

Principe de fonctionnement :

Il y a une source de tension et le point médian est obtenu en plaçant deux condensateurs de grande valeur en série. Ces deux condensateurs sont reliés entre eux par le courant de charge, lorsque le transistor T1 est passant, le condensateur C1 est déchargé, le condensateur C2 est chargé, et la tension $u=E/2$. De même, le transistor T2 rend passant le condensateur C2 pour se décharger, et lorsque le condensateur C1 est chargé, la tension $u=-E/2$.

C-Onduleur en pont :

Schéma de principe :

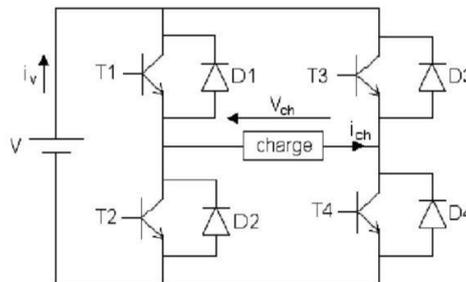


Figure 2.4 : schéma de principe d'onduleur en pont

Principe de fonctionnement :

Cette commande a pour but de fermer ou d'ouvrir les interrupteurs (Q1, Q4) et (Q2, Q3) simultanément, mais avec un certain temps de latence. Par conséquent, il peut agir à la fois sur la valeur efficace et sur l'amplitude fondamentale de la tension de sortie. Cette technique souffre de pertes importantes dues à la présence de circuits de filtrage.

2.4.2 Partie commande :

Introduction pour les techniques de commande :

Les onduleurs de tension peuvent être contrôlés selon différentes stratégies. Exister basse fréquence, ils sont entraînés à pleine onde et le signal de commande sera à fréquence de la tension requise en sortie, l'alimentation en courant continu doit être Réglable (par redresseur à thyristors ou hacheur). Aux hautes fréquences, ils sont contrôlés en modulation de largeur d'impulsion, ce qui La dernière stratégie permet d'ajuster l'amplitude et la fréquence Gardez la puissance continue constante (pont de diodes). Afin de produire une tension de sortie est proche de l'onde sinusoïdale, différentes stratégies de contrôle rendront :

1. Contrôle pleine onde ou 180°.
2. Commande 120°.
3. Commande 3-PWM.

Ces stratégies nécessitent un onduleur de tension triphasé

2.5 Onduleur Triphasé

2.5.1 Structure de l'onduleur de tension triphasé

Un onduleur triphasé peut être réalisé en combinant trois onduleurs monophasés dans l'un ou l'autre, simplement en décalant la commande des trois phases d'un tiers de cycle. La figure (2.2) montre un onduleur de tension triphasé à deux étages composés de trois demi-ponts monophasés *et* utilisant un diviseur de tension capacitif commun.

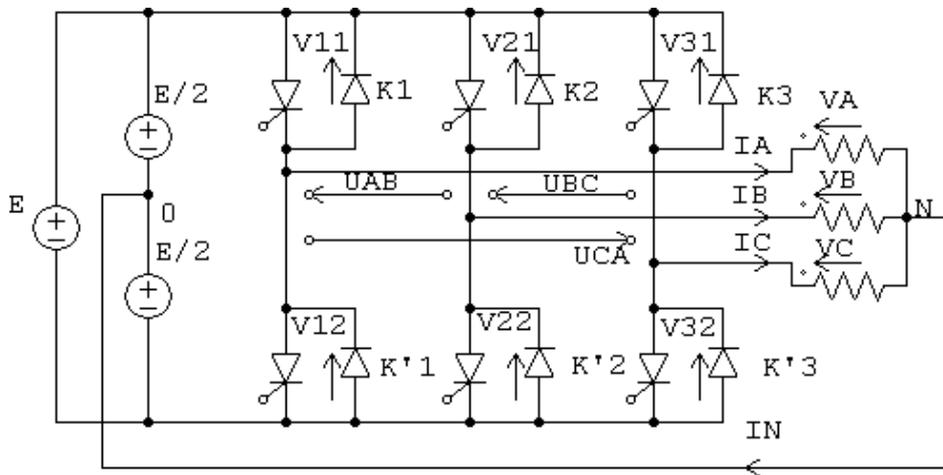


Figure 2.5 : Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (déséquilibré)

Chaque tension de sortie est tantôt égale à $(+U/2)$ tantôt égale à $(-U/2)$. Le commutateur fonctionne comme une seule phase, la seule différence est que le courant au point médian du diviseur de tension est I_N , donc $I_N = I_A + I_B + I_C$.

Si le récepteur est déséquilibré, notamment s'il comporte une charge monophasée installée entre phase et neutre, un raccordement du neutre au secteur est indispensable. Si le récepteur triphasé est équilibré (comme un moteur triphasé), la connexion entre le point neutre de la charge "N" et le point médian du diviseur de tension capacitif "O" peut être supprimée. La tension du pont de phase est indiquée dans Figure (2.3).

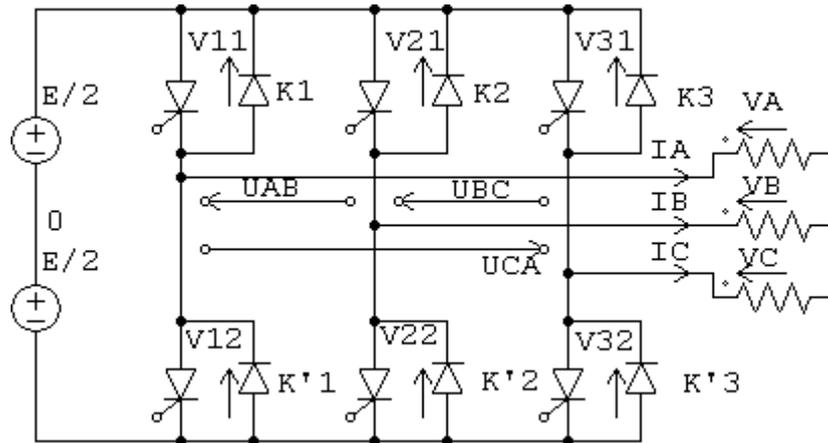


Figure 2.6 : Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (équilibré).

2.5.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Le schéma de principe de l'onduleur est fourni par (Figure 2.6) Pour assurer la continuité des courants alternatifs de sortie I_a , I_b et I_c , les interrupteurs K_1 et K_1' , K_2 et K_2' , K_3 et K_3' doivent être complémentaires deux, donc la tension de sortie V_A , V_B et V_C sont égales au tiers de leur période fondamentale T , et chaque demi-pont doit être commandé avec un retard de $T/3$ sur le demi-pont précédent. Par conséquent, en contrôle pleine onde, nous éteignons :

K_1 pour $\omega t = 0$	Et	K_1' pour $\omega t = \pi$.
K_2 pour $\omega t = 2\pi/3$	Et	K_2' pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$
K_3 pour $\omega t = 4\pi/3$	Et	K_3' pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$

Si le récepteur est déséquilibré, notamment s'il comporte une charge monophasée installée entre phase et neutre, un raccordement du neutre au secteur est indispensable. Si le récepteur triphasé est équilibré (comme un moteur triphasé), la connexion entre le point neutre "N" et le point médian de l'alimentation "0" peut être supprimée, et l'onduleur triphasé lui-même peut être obtenu par le retirer [26].

2.6 La commande MLI

La modulation PWM consiste alors à faire passer chaque alternance de la tension de sortie par une série d'impulsions carrées de largeur appropriée en ajustant la fréquence de commutation supérieure à la fréquence de sortie de l'onduleur. Ainsi, les harmoniques de la tension de sortie peuvent être poussées vers les hautes fréquences, ce qui aide au filtrage. De plus, la multiplication du nombre d'impulsions, chaque impulsion formant une alternance de

la tension de sortie, offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et d'obtenir une forme d'onde la plus proche possible d'une sinusoïde.

Les signaux de commande modulés PWM sont généralement générés en temps réel. Par conséquent, les moments d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont déterminés à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou éventuellement d'une combinaison des deux. Afin d'assurer le jugement en temps réel des moments de fermeture et d'ouverture, nous distinguons plusieurs types de modulation de largeur d'impulsion, mais nous ne nous intéressons qu'à la modulation sinusoïdale.

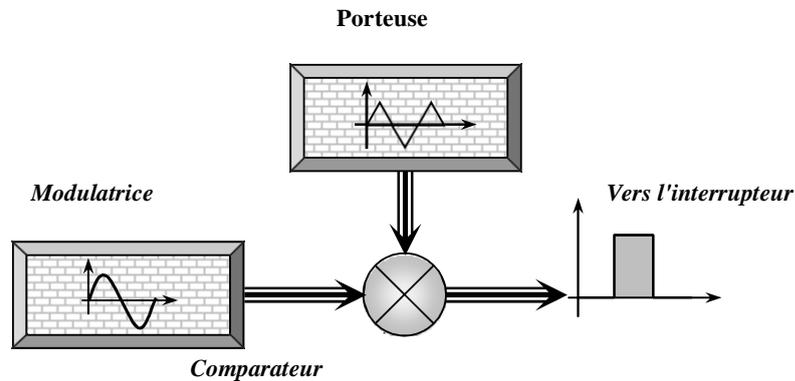


Figure 2.7 : Schéma synoptique de la MLI

2.6.1 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_p} \quad (2.1)$$

- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_I = \frac{f_p}{f_m} \quad (2.2)$$

La modulation montre que plus(m) est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de (r) la plus élevée possible.

2.7 Les avantages de la commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants :

- Bonne neutralisation des harmoniques par rapport aux onduleurs onde carrée ou onde fendue
- Il permet de changer la valeur fondamentale de l'onde de sortie.
- PWM est donc Moins cher et moins compliqué.
- PWM peut également alimenter plusieurs composants d'onduleur de moteur CA à partir de la même source CC.

2.8 Simulation

La figure (2.8) représente le schéma de la simulation sous MATLAB Simulink, elle consiste de d'une source de tension DC et :

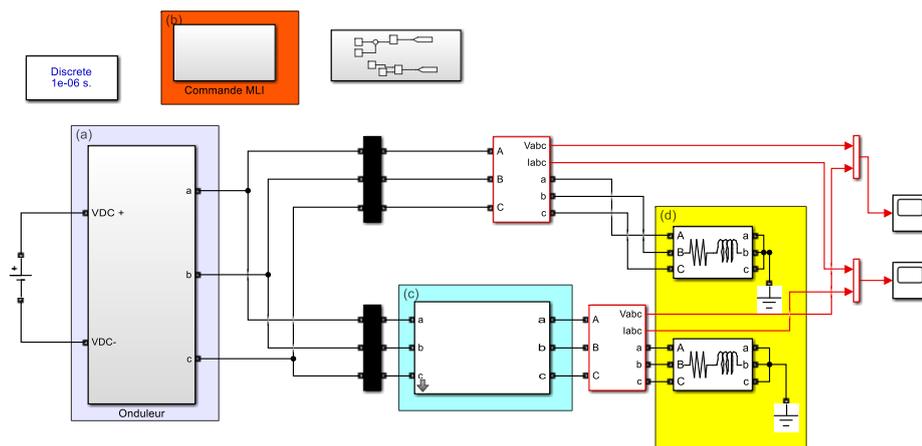


Figure 2.8 : Simulation de commande MLI d'onduleur avec filtre LC

(a) Onduleur triphasé : figure (2.9)

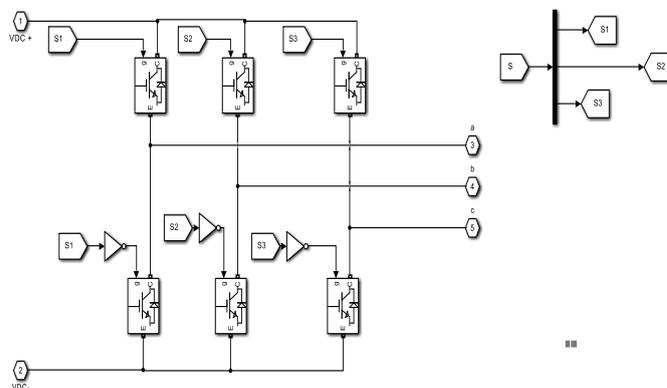


Figure 2.9 : Schéma de l'onduleur MLI

(b) Commande MLI : figure (2.10)

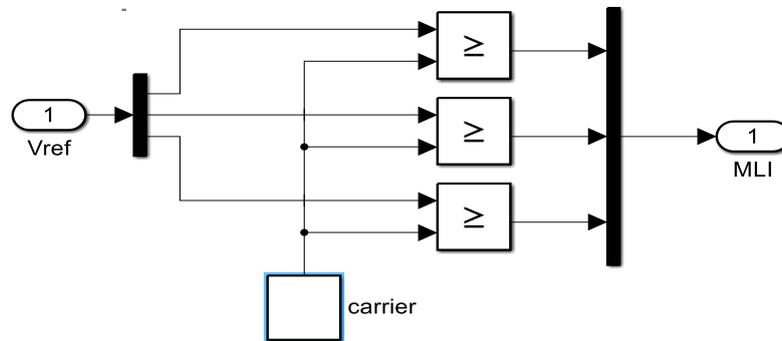


Figure 2.10 : Schéma de la commande de l'onduleur MLI

(c) Filtre LC

(d) Charges

D'abord la simulation de l'onduleur MLI

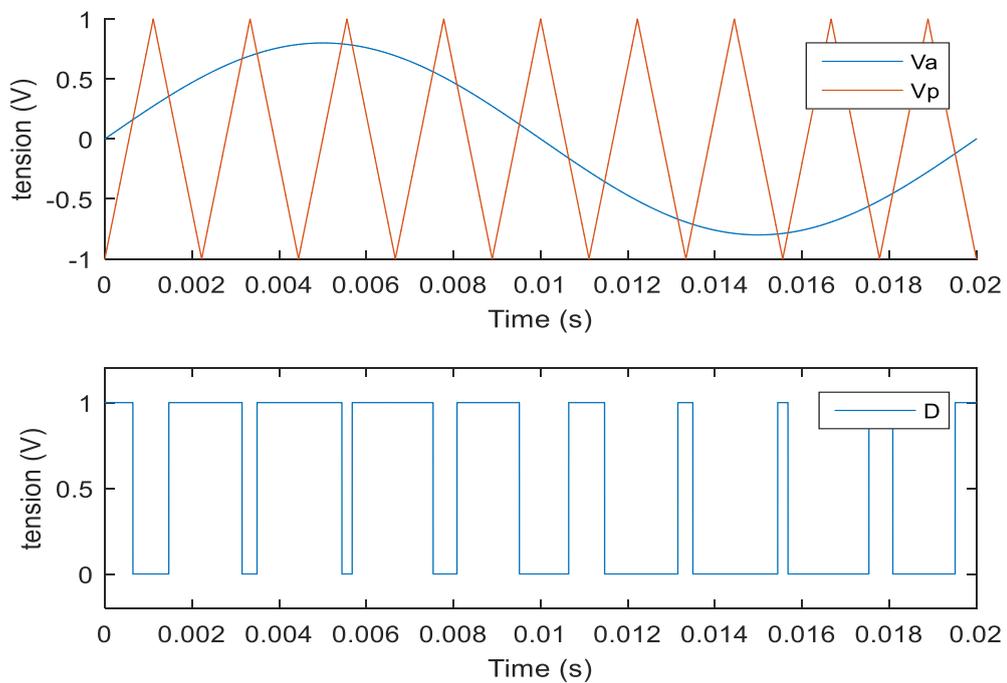


Figure 2.11 : Résultat simulation onduleur MLI

2.8.1 Interprétation des résultats

La tension de sortie de l'onduleur est formée d'impulsions successives d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus courante pour reproduire un signal PWM consiste à comparer un signal d'onde triangulaire appelé porteuse haute fréquence avec un signal de référence appelé modulateur, qui constitue l'énergie du signal recueilli en sortie de l'onduleur.

Le signal (D) représente la comparaison entre les deux signaux la tension de sortie et la porteuse. Quand le signal de sortie soit supérieur a la porteuse le signal (D) égale à 1.

Quand le signal de sortie soit inférieur à la porteuse le signal (D) égale à 0.

2.9 Le filtre LC

2.9.1 Définition

Un filtre LC est constitué d'une bobine et d'un condensateur. Les filtres LC sont couramment utilisés en électronique de puissance, par exemple dans les alimentations à découpage ou dans les chargeurs d'accumulateur

Lorsque vous travaillez avec VSI, l'une des principales préoccupations est la régulation de fréquence et la forme d'onde de tension et de courant sinusoïdale pure du côté sorti du PC. La distorsion harmonique des tensions de sortie d'un VSI dépend des paramètres du filtre LC. Par les méthodes traditionnelles, l'atténuation des fréquences de commutation VSI dépend de la fréquence de coupure du filtre, une fréquence de coupure plus petite entraîne une plus grande atténuation de l'ondulation de tension. En relation, la bande passante du filtre a un impact similaire sur l'atténuation de l'ondulation de tension. Une bande passante de filtre LC élevée peut entraîner une atténuation plus faible [27], De cela on peut dire que Le filtre ne dépend pas de type de la charge

2.9.2 L'utilisation du filtre

L'optimisation proposée du filtre LC contribue à la qualité délivrée de l'énergie électrique en réduisant la quantité d'harmoniques injectées pendant et après l'événement de transition, tout en maintenant les niveaux d'injection d'harmoniques à une norme autorisée dans un état connecté de la MG. Cette proposition est qualifiée d'indépendante du système car elle utilise les données locales de la couche de contrôle primaire pour obtenir les paramètres optimaux du filtre LC, cela est possible car il n'est pas nécessaire de reconfigurer le contrôleur central du

micro-réseau puisqu'il n'y a pas de lien entre le primaire couche de contrôle et le contrôleur central du micro-réseau [28]. En d'autres termes, les performances du filtre et les données locales utilisées au cours du processus d'optimisation sont indépendantes du contrôleur central du micro-réseau.

2.9.3 Le rôle du filtre

Le rôle classique de l'onduleur est d'alimenter, à partir d'une source continue, une charge alternative. Les harmoniques doivent être minimisés car seuls les fondamentaux assurent le transfert de la puissance utile. Cependant il faut qu'on utilise un filtre LC pour assurer la diminution des harmoniques.

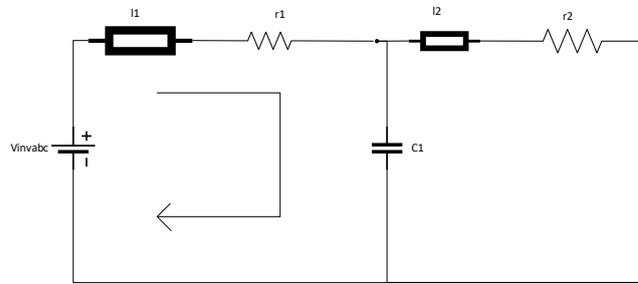


Figure 2.12 : Circuit de filtre LC

2.10 Les résultats de simulation avant et après l'utilisation de filtre

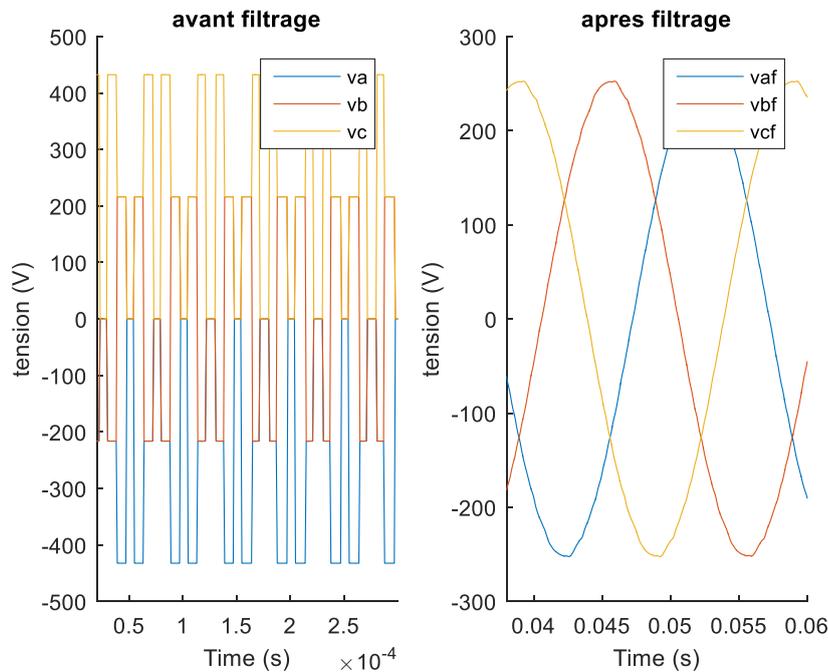


Figure 2.13 : Tension simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge résistive

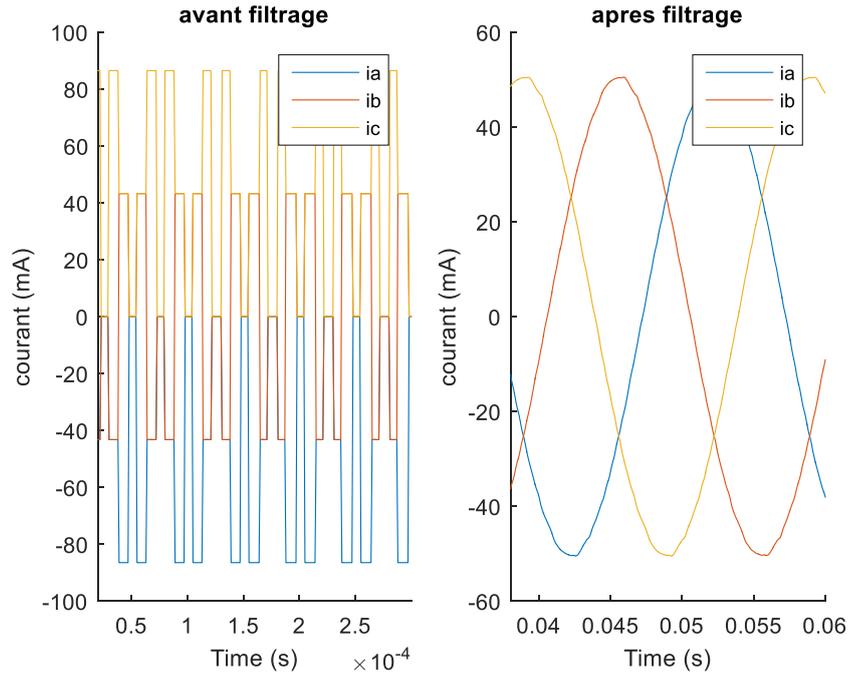


Figure 2.14 : Courant simple de sortie avant et après le filtrage une charge résistive

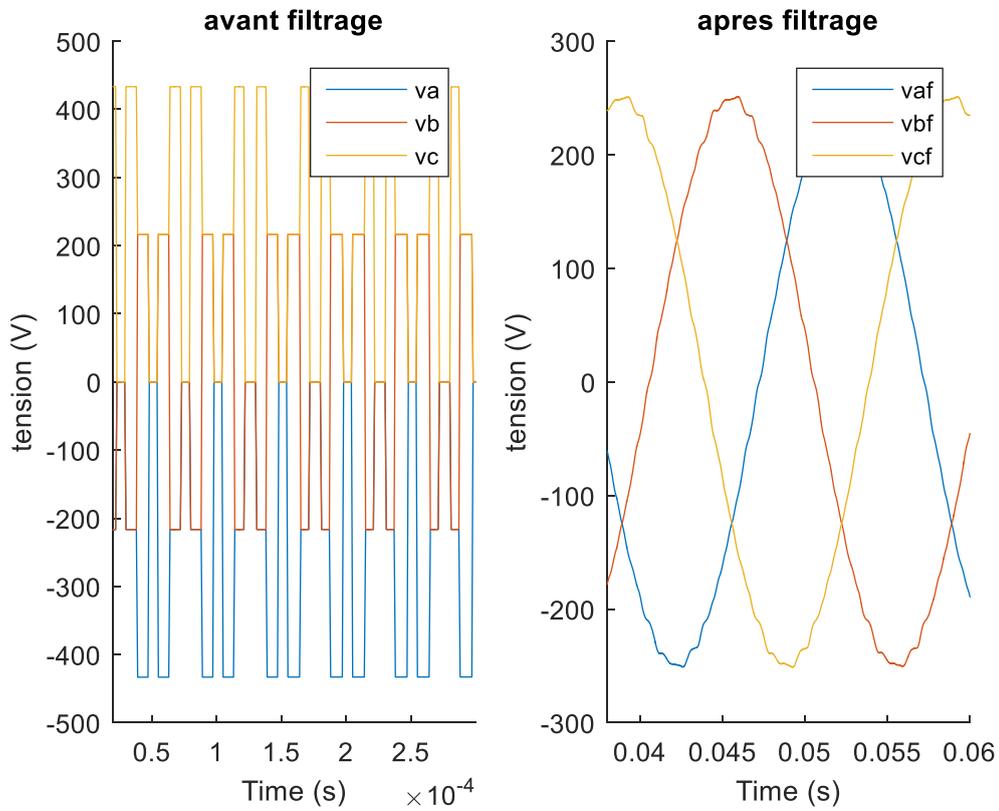


Figure 2.15 : Tension simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge inductive

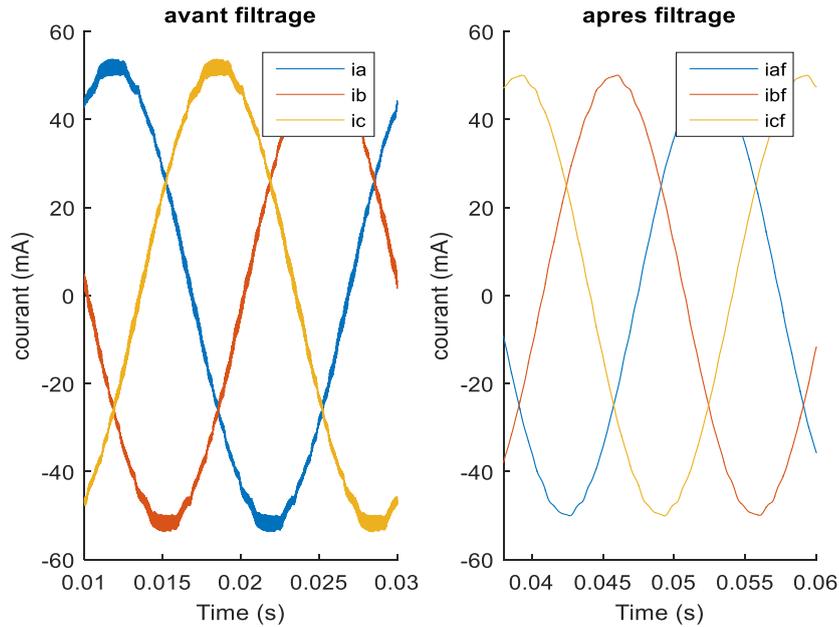


Figure 2.16 : Courant simple de sortie avant et après le filtrage avec une charge inductive

2.11 Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation on a remarqué que :

- le filtre élimine les harmoniques et stabilise les signaux.
- l'efficacité de filtre ne dépend pas du type de la charge.
- il y'a pas de différence dans la tension de sortie quel que soit la charge.
- il y'a une diminution des harmoniques dans le courant de sortie après le filtrage et avec une charge inductive

2.12 Conclusion

Ce chapitre cible l'étude des onduleurs commandé par la technique MLI et filtré par le filtre LC. Et puisque c'est un élément essentiel dans l'électronique de puissance, il faut bien le contrôler pour une bonne fiabilité. C'est ce qu'on va traiter dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Modélisation Et Conception

3.1 Introduction

Récemment, les micro-réseaux ont gagné en popularité en raison de leur efficacité, de leur fiabilité, de leur flexibilité et de leur évolutivité. Ils représentent une solution viable pour combiner de petits systèmes de production basés sur des sources d'énergie distribuées renouvelables telles que le solaire et l'éolien avec des systèmes de charge et de stockage pour fournir des améliorations évolutives des services publics d'électricité traditionnelle. Pour connecter les DER au réseau électrique et/ou aux charges locales, les onduleurs à source de tension sont désormais largement utilisés, permettant un fonctionnement en mode connecté réseau ou îloté.

Le contrôle primaire est souvent utilisé pour assurer un fonctionnement sûr du micro-réseau et un partage de puissance approprié entre les unités DG connectées en parallèle sans communication (décentraliser). Dans ce mode de contrôle, les onduleurs triphasés commandés en tension avec des configurations de filtre LC ont été couramment utilisés dans les micro-réseaux. Afin d'assurer le fonctionnement stable de ce dernier, un contrôleur interne à double boucle est souvent introduit dans le champ de commande principal. Cependant, pour analyser la stabilité du système et sélectionner correctement les paramètres de courant et de tension du contrôleur interne, il est nécessaire d'étudier la modélisation de sa boucle interne.

La stratégie de contrôle de ce dernier consiste en deux boucles cascades, le régulateur de tension externe et le régulateur de courant interne basés sur des contrôleurs PI. Cependant, pour régler leurs paramètres, de nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur la modélisation et la conception des boucles de contrôle internes dans le repère abc et le repère dq.

3.2 Contrôleur interne pour les onduleurs triphasés

La structure de contrôle primaire de l'unité DG triphasée basée sur le contrôle interne est illustrée à la **figure 3.1**. Cette figure contient le DG qui est connecté au Point de Couplage Commun (PCC) ou bien le bus AC, via un étage de puissance composé d'un onduleur triphasé avec un filtre LC et d'une ligne d'impédance. De plus, des charges linéaires et non linéaires sont aussi connectées. Selon cette figure, On voit que le bloc de contrôle primaire contient deux blocs : (i) celui du partage de la puissance, généralement à base de statisme (Droop Control), il génère la tension de référence envoyée au deuxième bloc qui est (ii) le contrôleur

interne. Il existe plusieurs méthodes de contrôle dans la littérature, les plus répandus sont à base des régulateurs PI dans le repère dq.

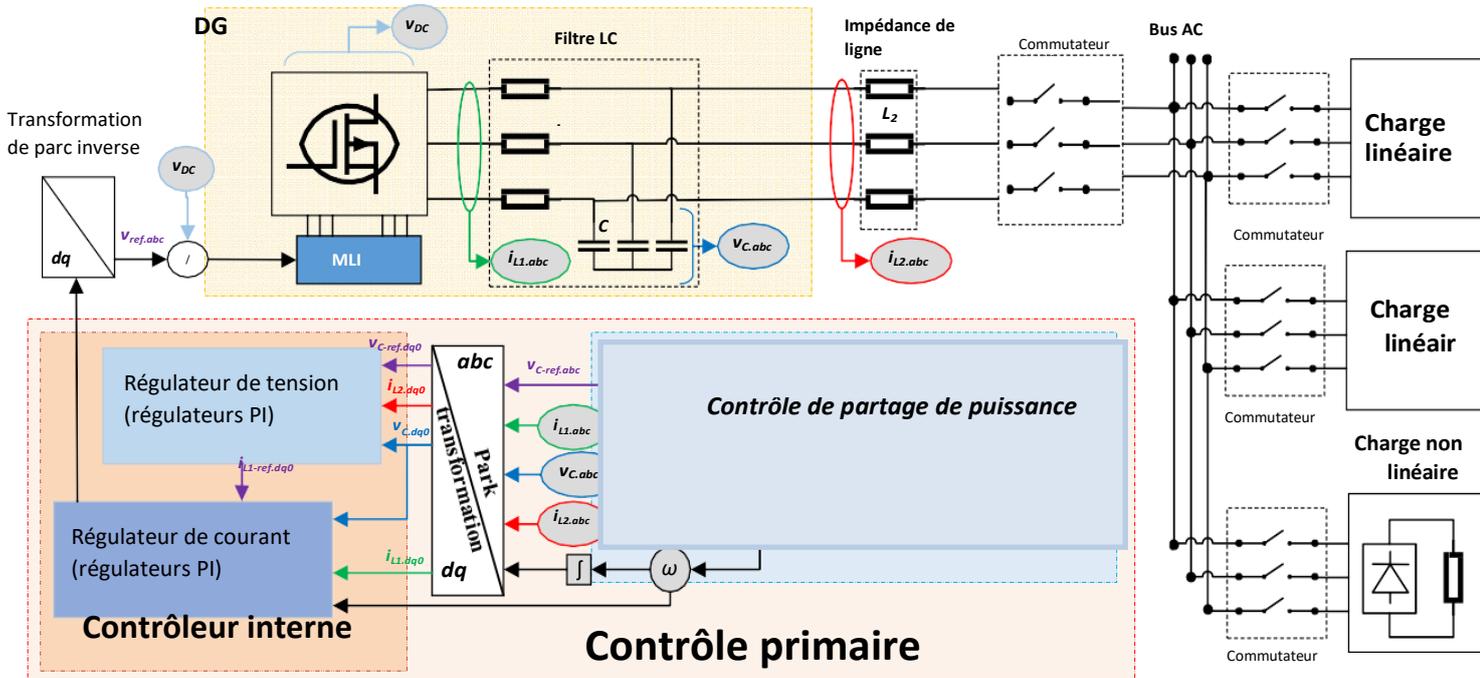


Figure 3.1 : Schéma du principe de la commande primaire basée sur le contrôleur interne pour un onduleur triphasé connecté à un bus AC.

3.2.1 Contrôleur de partage de puissance

Comme le montre la **Figure 3.1**, Cette partie est chargée de contrôler l'équilibre de puissance entre les unités DG. Le contrôle de statisme est le bloc de contrôle obligatoire dans cette étape de contrôle, qui permet le partage de puissance active et réactive. Il fournit une référence de tension sinusoïdale dans le système dans le repère abc.

3.2.2 Contrôleur interne à double boucle

Le rôle de contrôleur interne, c'est d'introduire et régler la sortie de l'onduleur. Il s'agit d'une structure de contrôle à double boucle composée de deux boucles de contrôle, une boucle de tension externe et une boucle de courant interne. Les deux sont implémentés à base de contrôleurs (PI).

La première boucle consiste à réguler la tension de sortie de l'onduleur et fournit la référence de courant d'inductance de filtrage pour la deuxième boucle, qui sert à contrôler ce courant.

On note que le contrôleur interne a la tension et le courant de sortie mesurés de l'onduleur, le courant d'inductance de filtre, la tension d'alimentation (DC) et la tension de référence générée par le contrôleur de puissance comme entrées, et produit le signal de référence de la tension d'onduleur. Ce dernier signal est envoyé à un générateur (MLI) qui délivre les signaux de commande de commutation de l'onduleur

Comme mentionné, les boucles de contrôle de tension et de courant de cette commande sont implémentées dans le repère (dq), par conséquent, deux contrôleurs (PI) doivent être introduits pour contrôler les composantes (dq) de la tension du condensateur et du courant d'inductance dans la boucle externe et interne.

La transformation de Park et sa version inverse sont considérées comme faisant partie du contrôleur interne, effectuant respectivement (abc-dq) et (dq-abc).

Cependant, étant donné que les modèles de l'onduleur filtré (LC) et des boucles de contrôle de courant et de tension sont nécessaires pour régler les paramètres des régulateurs de tension et de courant, la modélisation mathématique est fournie dans la section suivante.

3.3 Modélisation et conception des boucles de commande internes dans le repère dq

Cette section se concentre en premier lieu sur la dérivation du modèle mathématique de l'onduleur-filtre LC dans les coordonnées dq ; deuxièmement, le schéma de principe de la boucle de contrôle de tension et de courant ainsi que sa formule mathématique sont fournis ; enfin, la conception et le calcul des paramètres du régulateur de tension et de courant est établie.

3.3.1 Modélisation d'un onduleur triphasé suivi du filtre LC en repère dq

La **figure 3.2** illustre le circuit électrique d'un onduleur triphasé suivi d'un filtre LC, où l'onduleur est représenté par une source de tension alternative. En assumant que le système est isolé, c'est-à-dire $V_g=0V$, les équations décrivant le comportement des courants des inductances et des tensions des condensateurs dans le repère abc sont obtenues en appliquant la loi des mailles sur la maille (1)

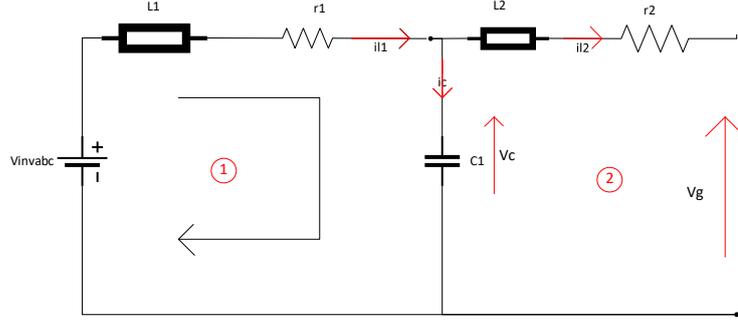


Figure 3.2 : circuit de filtre LC

$$v_{L.abc} + v_{r.abc} + v_{C.abc} = v_{inv.abc} \quad (3.1)$$

$$L_1 \frac{di_{L1.abc}}{dt} + r_1 i_{L1.abc} + v_{c.abc} - v_{inv.abc} = 0 \quad (3.2)$$

avec $v_{L.abc} = L_1 \frac{di_{L1.abc}}{dt}$ et $v_{r.abc} = r_1 i_{L1.abc}$

Plus de détails sur le calcul sont dans l'annexe A.

On prend le système d'équations ; sur le repère abc ; comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{L1.abc}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1.abc} - \frac{1}{L_1} v_{c.abc} + \frac{1}{L_1} v_{inv.abc} \\ \frac{dv_{c.abc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1.abc} - \frac{1}{C} i_{L2.abc} \end{cases} \quad (3.3)$$

Où $i_{L1.abc}$ et $i_{L2.abc}$ sont les courants du filtre et de sortie respectivement, $v_{C.abc}$ sont les tensions des condensateurs. Considérant la transformation de Park, et en supposant que le système triphasé est symétrique, le modèle dynamique de l'onduleur-filtre LC peut être obtenu dans le repère dq par le système d'équations (3.4) :

$$\begin{cases} \frac{di_{L1d}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1d} + \frac{1}{L_1} v_{inv.d} - \frac{1}{L_1} v_{C.d} + \omega_x i_{L1q} \\ \frac{di_{L1q}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1q} + \frac{1}{L_1} v_{inv.q} - \frac{1}{L_1} v_{C.q} - \omega_x i_{L1d} \\ \frac{dv_{Cd}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1d} - \frac{1}{C} i_{L2d} + \omega_x v_{Cq} \\ \frac{dv_{Cq}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1q} - \frac{1}{C} i_{L2q} - \omega_x v_{Cd} \end{cases} \quad (3.4)$$

Où ω_x est la fréquence angulaire de la référence du repère $\theta = \int \omega_x dt$.

Voir l'annexe B pour plus de détails sur la transformation.

En appliquant la transformation de Laplace sur le système d'équations précédent, on obtient :

$$\begin{cases} i_{L1d} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{invd} - v_{Cd} + L_1\omega_x i_{L1q}) \\ i_{L1q} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{invq} - v_{Cq} - L_1\omega_x i_{L1d}) \\ V_{Cd} = \left(\frac{1}{Cs}\right)(i_{L1d} - i_{L2d} + C\omega_x v_{Cq}) \\ V_{Cq} = \left(\frac{1}{Cs}\right)(i_{L1q} - i_{L2q} + C\omega_x v_{Cd}) \end{cases} \quad (3.5)$$

L'annexe C contient les détails de cette transformation.

Ces équations définissent le modèle moyen d'un onduleur *commandé en tension* filtré par le filtre LC dans le repère dq, son schéma est illustré sur la **Figure 3.3**.

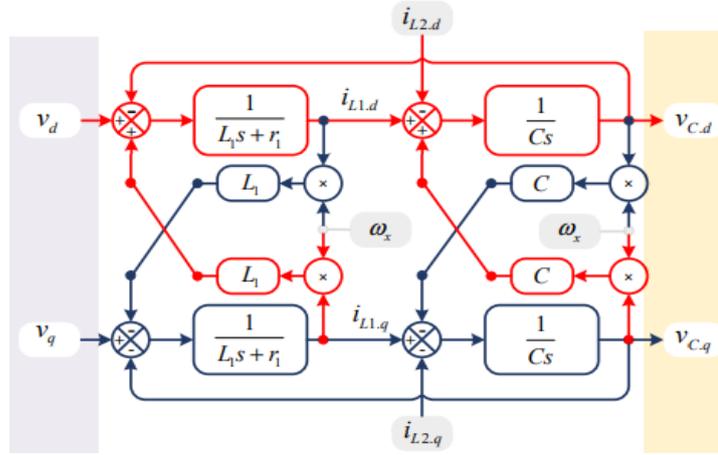


Figure 3. 3: Schéma fonctionnel du modèle d'onduleur-filtre LC en repère dq

3.3.2 Stratégies de contrôle de tension et de courant et les formulations mathématiques

A. Boucle de contrôle du courant :

La stratégie de contrôle proposée est basée sur l'intégration d'un régulateur PI dans chaque axe (i.e. un régulateur pour l'axe d et un autre pour l'axe q). Sachant que les équations représentant ce genre de contrôle sont donnés par :

$$\begin{cases} i_{L1-ref.d} = \left(K_{p.v} + \frac{K_{i.v}}{s}\right)(v_{C-ref.d} - v_{C.d}) \\ i_{L1-ref.q} = \left(K_{p.v} + \frac{K_{i.v}}{s}\right)(v_{C-ref.q} - v_{C.q}) \end{cases} \quad (3.6)$$

Où $K_{p.v}$ et $K_{i.v}$ sont les gains du contrôleur PI.

A partir du modèle mathématique de l'onduleur-filtre et son schéma sur la **figure3.3**, on constate la présence des termes de couplage $C\omega_x v_{C.dq}$ et de compensation et $i_{L2.dq}$ entre les deux axes d et q. Ces termes doivent être pris en considération lors de la modélisation du contrôleur proposé en les ajoutant avec un signe inverse.

Les équations (3.7) seront donc :

$$\begin{cases} i_{L1-ref.d} = \left(K_{p.v} + \frac{K_{i.v}}{s} \right) (v_{C-ref.d} - v_{C.d}) + i_{L2.d} - C\omega_x v_{C.q} \\ i_{L1-ref.q} = \left(K_{p.v} + \frac{K_{i.v}}{s} \right) (v_{C-ref.q} - v_{C.q}) + i_{L2.q} - C\omega_x v_{C.d} \end{cases} \quad (3.7)$$

B. Boucle de contrôle de la tension

Le même principe est appliqué pour la boucle externe, où un régulateur PI est implémenté dans chaque axe (i.e. un régulateur pour l'axe d et un autre pour l'axe q). Sachant que les équations représentant ce genre de contrôle sont donnés par :

$$\begin{cases} v_{ref.d} = \left(K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{s} \right) (i_{L1-ref.d} - i_{L1.d}) \\ v_{ref.q} = \left(K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{s} \right) (i_{L1-ref.q} - i_{L1.q}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Où $K_{p.i}$ et $K_{i.i}$ sont les gains du contrôleur PI.

A partir du modèle mathématique de l'onduleur-filtre et son schéma sur la **figure3.3**, on constate la présence des termes de couplage $L_1\omega_x i_{L1.q}$ et de compensation et $v_{C.dq}$ entre les deux axes d et q. Ces termes doivent être pris en considération lors de la modélisation du contrôleur proposé en les ajoutant avec un signe inverse.

Les équations (3.9) seront donc :

$$\begin{cases} v_{ref.d} = \left(K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{s} \right) (i_{L1-ref.d} - i_{L1.d}) + v_{C.d} - L_1\omega_x i_{L1.q} \\ v_{ref.q} = \left(K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{s} \right) (i_{L1-ref.q} - i_{L1.q}) + v_{C.q} + L_1\omega_x i_{L1.d} \end{cases} \quad (3.9)$$

Donc on obtient le système d'équations final dans le système d'équation (3.12) :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L1.d} = i_{L1.d}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \left(\frac{K_p + r_1}{L_1} \right) s + \frac{K_i}{L_1}} \right) \\ i_{L1.q} = i_{L1.q}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \left(\frac{K_p + r_1}{L_1} \right) s + \frac{K_i}{L_1}} \right) \end{array} \right. \quad (3.12)$$

De plus, basé sur l'hypothèse que le contrôleur interne du courant est plus rapide par rapport au régulateur de tension :

$$v_{i.dq}^{FB.ss}(s) = \frac{i_{L1.dq}}{i_{L1-ref.dq}} = 1 \quad (3.13)$$

En conséquence, la fonction de transfert en boucle fermée de la boucle de contrôle de tension peut être dérivée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{Cd} = \left(\frac{1}{Cs} \right) (i_{L1d} - i_{L2d} + C\omega_x v_{Cq}) \\ v_{Cq} = \left(\frac{1}{Cs} \right) (i_{L1q} - i_{L2q} + C\omega_x v_{Cd}) \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Voir l'annexe E pour plus de détails.

Donc on obtient le système d'équations final dans le système d'équation (3.15) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{Cd} = v_{Cd}^{ref} \frac{1}{C} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C}} \right) \\ v_{Cq} = v_{Cq}^{ref} \frac{1}{C} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C}} \right) \end{array} \right. \quad (3.15)$$

En faisant correspondre les équations caractéristiques de la fonction de transfert en boucle fermée de la tension et le modèle de contrôle du courant en boucle fermée, avec des fonctions de transfert du second ordre souhaitées, exprimé par le système d'équation (3.16) :

$$\begin{cases} v_{i.dq}^{FB}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} \\ v_{v.dq}^{FB}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta_v \omega_v s + \omega_v^2} \end{cases} \quad (3.16)$$

Les expressions des paramètres $\zeta_i, \zeta_v, \omega_i, \omega_v$ qui dénotent l'amortissement et la fréquence propre des régulateurs de courant et de tension, respectivement, peuvent être déduits comme suit :

$$\begin{cases} \zeta = \frac{1}{2\omega_i} \left(\frac{r_1 + k_{p.i}}{L_1} \right) \\ \omega = \sqrt{\frac{k_{i.i}}{L_1}} \end{cases}, \begin{cases} \zeta = \frac{k_{p.v}}{2C\omega_v} \\ \omega_v = \sqrt{\frac{k_{i.v}}{C}} \end{cases} \quad (3.17)$$

Par conséquent, les gains des régulateurs de courant et de tension peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} k_{p.i} = 2L_1\zeta_i\omega_i - r_1 \\ k_{i.i} = L_1\omega_i^2 \end{cases}, \begin{cases} k_{p.v} = 2L_1\zeta_v\omega_v - r_1 \\ k_{i.v} = C\omega_v^2 \end{cases} \quad (3.18)$$

$\zeta_i, \zeta_v, \omega_i, \omega_v$ sont choisis à partir du temps de réponse et dépassement désirés tel que :

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un contrôleur interne basé sur les régulateurs PI a été proposé. Ce contrôleur consiste de deux boucles cascades : une pour le contrôle du courant et l'autre pour la tension.

Pour cela, la modélisation et la conception de ces deux boucles a été faite, de plus de leurs fonctions de transfert.

Vers la fin de ce chapitre, les paramètres des régulateurs utilisés ont été précisément choisis en tenant compte du temps réponse et dépassement désirés dans le système.

Chapitre 4

Simulation, Résultats Et Discussions

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé la modélisation et le calcul des paramètres des régulateurs PI, en vue de les utiliser dans la simulation présentée dans ce chapitre.

Ce dernier chapitre vise à mettre à l'épreuve notre système de contrôle, nous avons pris en compte des scénarios et des conditions réalistes variées. Les résultats obtenus et leurs interprétations, nous permettront de conclure quant à la fiabilité, la robustesse et à l'efficacité de notre approche de contrôle dans le contexte d'un micro-réseau.

4.2 Description du système

Cette partie est dédiée à l'explication des différents éléments de la chaîne étudiée.

La figure (4.1) illustre le modèle Simulink d'un système micro-réseau.

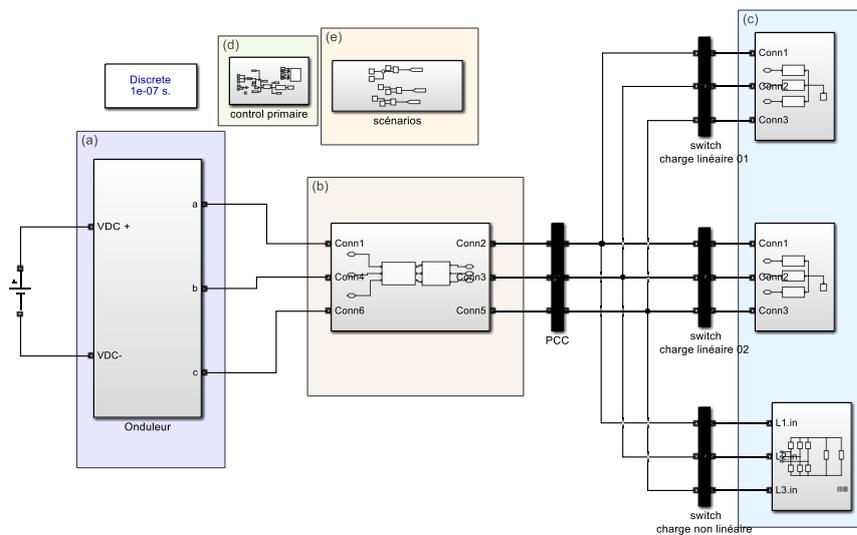


Figure 4.1 : schéma bloc du système étudié

Comme le montre la figure (4.1), ce système est composé de 5 blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont :

(a): Le schéma bloc d'un onduleur triphasé en pont avec la commande MLI étudié dans le deuxième chapitre. La figure 4.2 illustre son schéma sous Matlab.

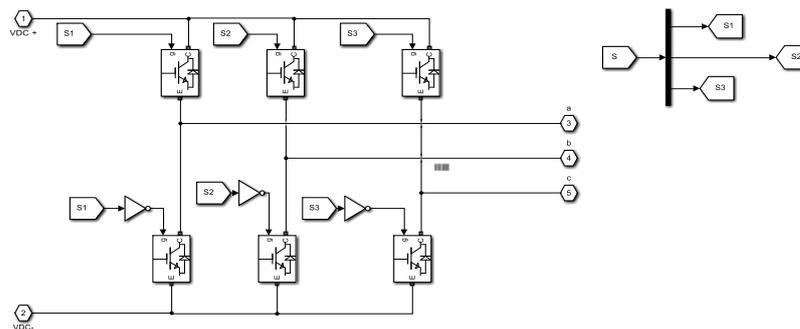


Figure 4.2 : schéma bloc du l'onduleur.

(b) : Le filtre LC avec l'impédance de ligne.

(c) : Les trois charges : (i) deux linéaires représentés par des résistances et des inductances et (ii) une non linéaire représenté par une diode incontrôlable suivie par une charge RC

(d) : Le contrôle primaire à base du contrôleur interne étudié dans le chapitre précédent, son schéma bloc est présenté dans la figure 4.3.

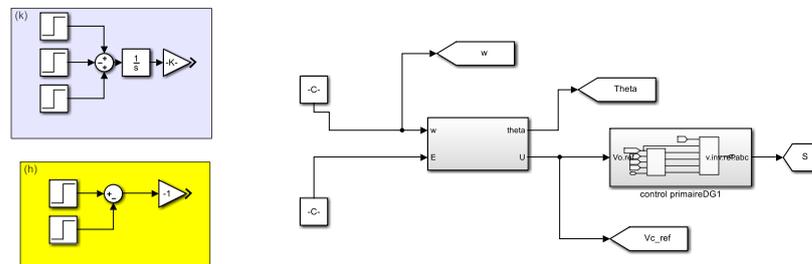


Figure 4.3 : schéma bloc du control primaire

Tel que :

(k) : c'est le bloc qui sert à faire le test de fréquence.

(h) : c'est le bloc qui sert à faire le test de d'amplitude.

(e) : le bloc permettant de créer les scenarios des charges sur plusieurs intervalles, en commandant le temps de fonctionnement de leurs commutateurs (switch).

Les paramètres de la simulation sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Les paramètres de la simulation

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Fréquence de commutation	f_s	KHz	20
Tension DC	U_{DC}	V	700
L'impédance du filtre	L_1, r_1	mH, Ω	2.7, 0.6
L'impédance du filtre	L_2, r_2	mH, Ω	1, 0.1
La capacité du filtre	C, r	$\mu F, \Omega$	15, 0.5
L'impédance de la ligne	L, r	mH, Ω	0.1, 0.01
Tension nominale	E_n	V	220
Fréquence nominale	F_n	Hz	50
L'impédance de la charge linéaire	L_L, r_L	mH, Ω	1,50
L'impédance de la charge non linéaire	L_{nL}, r_{nL}	mH, Ω	0,100
La capacité de la charge non linéaire	C_{nL}, r_{nL}	$\mu F, \Omega$	1000,100
Gain du régulateur PI	K_{pv}	-	0.1839
Gain du régulateur PI	k_{iv}	-	183.87
Gain du régulateur PI	k_{pi}	-	6.2831
Gain du régulateur PI	k_{ii}	-	231

4.3 Simulation

Après le choix des paramètres des régulateurs et la modélisation du système, dans cette partie, nous voulons valider la robustesse du contrôle proposé, pour cela nous avons effectué plusieurs test et scénarios.

La tension et le courant de sortie de l'unité de génération au bus AC en conditions standards sont montrés sur la **figure 4.4**.

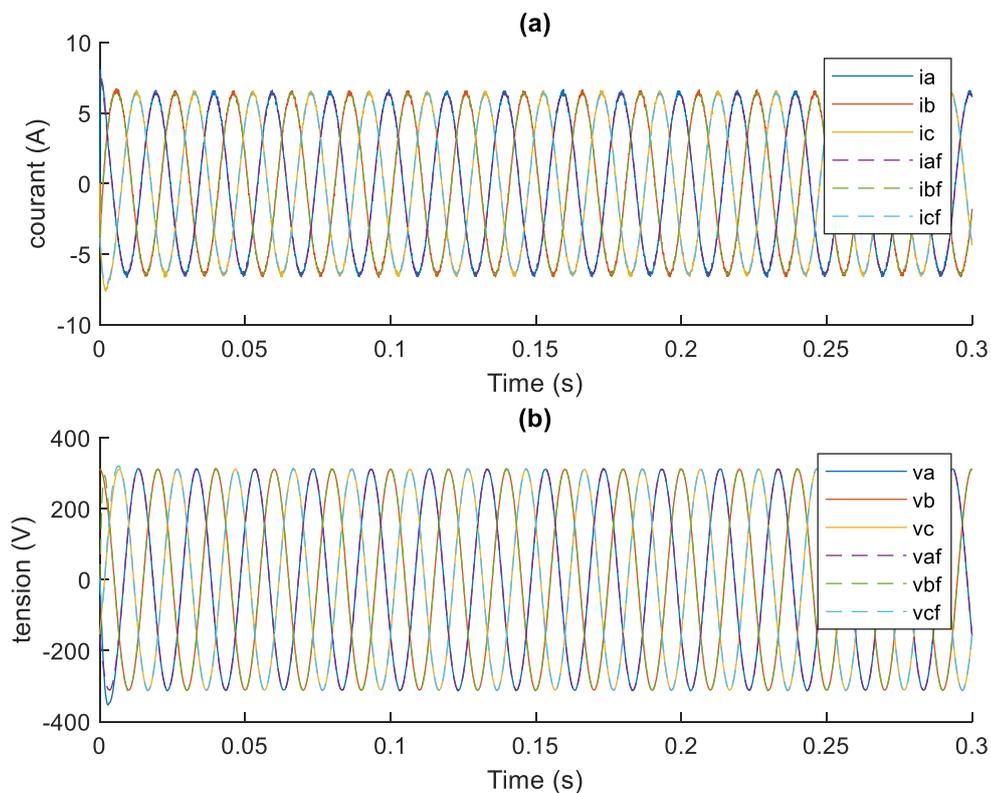


Figure 4.4 : la simulation sous les conditions standards

Noter que les conditions standards sont la présence de la charge linéaire et les références (amplitude et fréquence) constantes et nominales.

On a une Tension et courant stable et sinusoïdale et le control suit la référence.

Après cela, on passe à l'application des tests de robustesse, tel que :

4.3.1 Le premier test : augmentation de la demande en puissance

En premier lieu, on a démarré la simulation avec une seule charge linéaire, puis on a ajouté une deuxième charge linéaire sur l'intervalle [0,1s 0,2s]. Les courants et tensions de sortie sont illustrés sur la figure 4.5 (a) et (b) respectivement.

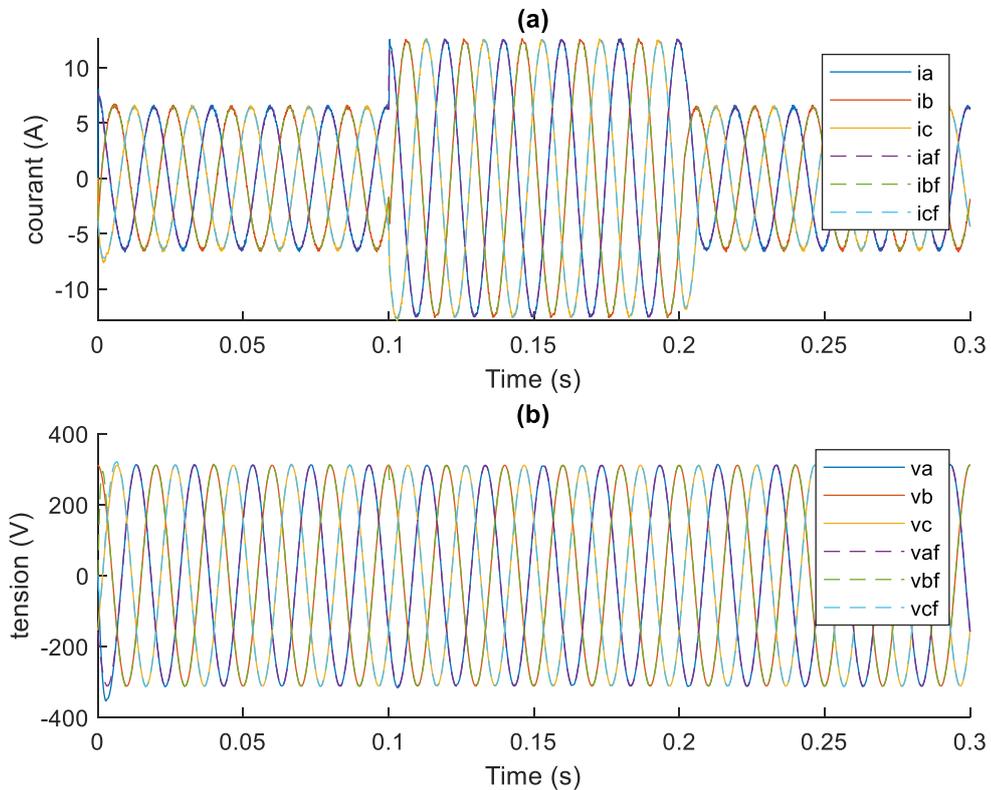


Figure 4.5 : la simulation avec une deuxième charge linéaire

On remarque que l'ajout de la deuxième charge conduit à l'augmentation de la demande en puissance, c'est-à-dire l'augmentation du courant comme le montre la figure 4.5.

Par contre, en termes de tension, on constate que le système est maintenu stable, ce qui valide la robustesse du contrôleur étudié.

4.3.2 Le deuxième cas : alimentation d'une charge non linéaire

Dans cette partie, le contrôleur a été testé en présence d'une charge non linéaire, qui représente l'un des grands défis dans le contrôle des MG. Les courants et tensions de sortie sont illustrés sur la figure 4.6 (a) et (b) respectivement.

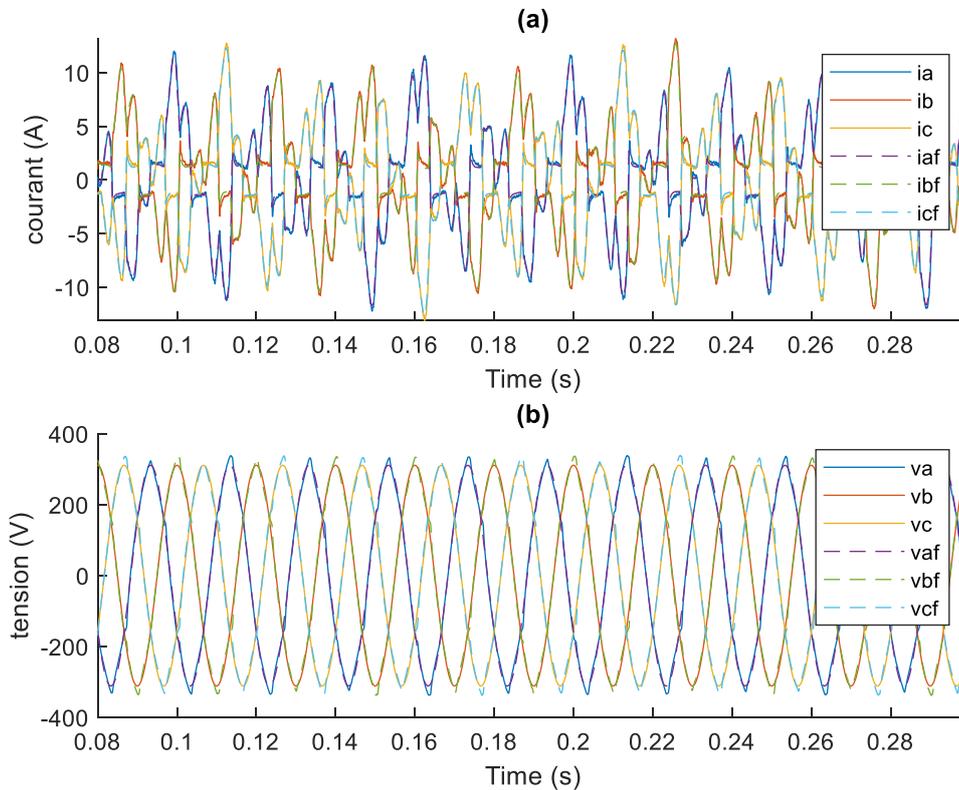


Figure 4.6 : la simulation avec une charge non linéaire

D'après ces graphs, on remarque que la présence de la charge non linéaire n'a pas affecter la robustesse du système, il est bien remarquable qu'il est maintenu stable.

4.3.3 Le troisième cas : fréquence variable

Dans ce cas on a démarré la simulation avec une seule charge linéaire puis on a augmenté la fréquence dans l'intervalle [0,1 0,3]. Les courants et tensions de sortie sont illustrés sur la figure 4.7 (a) et (b) respectivement.

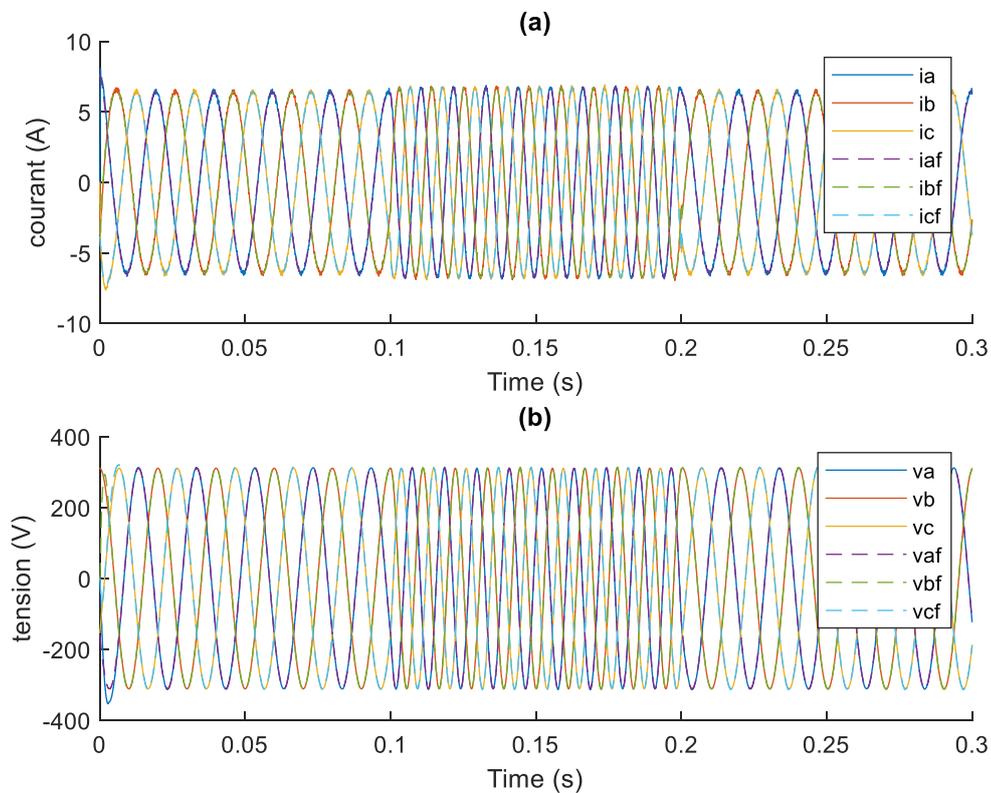


Figure 4.7 : la simulation avec une augmentation de fréquence

On remarque que le pas de la forme sinusoïdal de la tension et du courant se diminue et toujours le contrôleur garde sa efficacité et sa robustesse encore dans ce teste.

4.3.4 Le quatrième cas : amplitude variable

En présence d'une charge linéaire, l'amplitude de référence a été diminuée l'intervalle sur [0,1 0,2]. Les courants et tensions de sortie sont illustrés sur la figure 4.8 (a) et (b) respectivement.

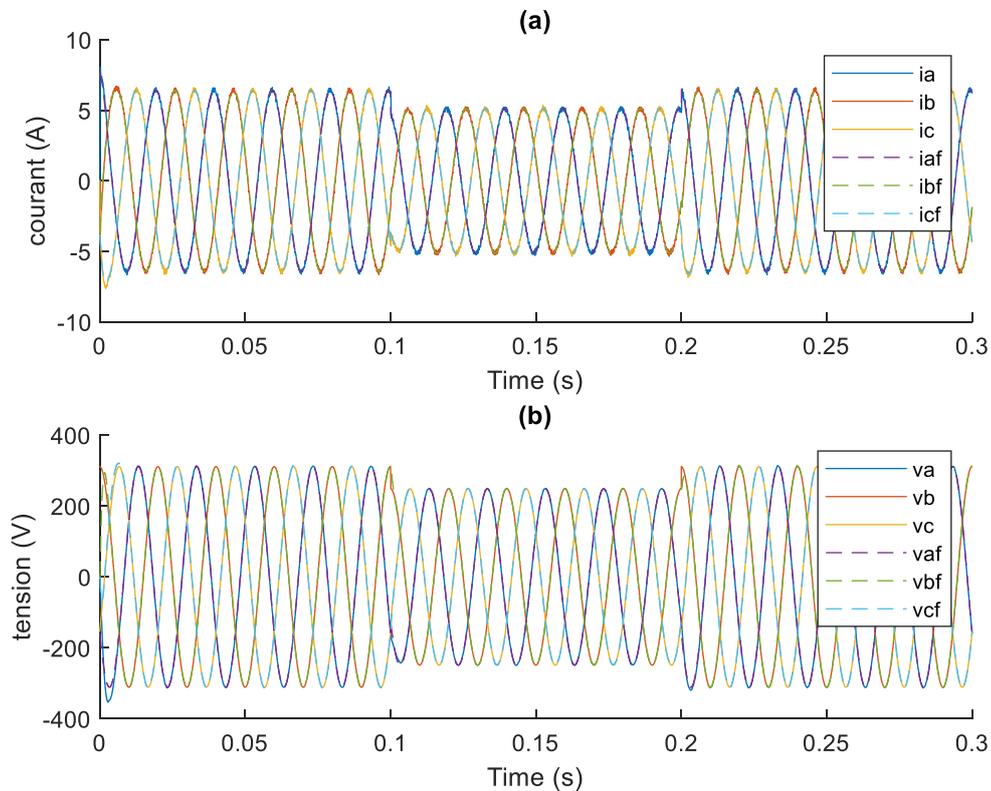


Figure 4.8 : la simulation avec une diminution de la tension

On remarque qu'il y'a une diminution dans la valeur du courant et tension avec la robustesse du contrôleur.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a confirmé que le contrôle proposé est fiable en termes de temps de réponse et de dépassement, et cela est due au choix précis des paramètres des régulateurs utilisés.

Notre contrôleur Suit la référence de tension ainsi que celle du courant sous les différentes conditions d'opérations parfaitement.

D'après tout ce on a conclu qu'une fois les paramètres de régulation été précis le contrôleur devient très robuste, très efficace et garder sa perfection sans dépassement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étude des micro-réseaux et leurs stratégies de contrôle représentent une avancée significative dans la recherche d'une transition énergétique vers des sources plus propres et renouvelables. Il s'agit d'une étape importante vers un avenir énergétique durable, où les énergies renouvelables joueront un rôle central dans la satisfaction de nos besoins énergétiques tout en préservant notre environnement.

Notre travail s'est ainsi concentré sur l'étude et l'analyse d'un micro-réseau, et pour atteindre cet objectif, nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé de manière générale les micro-réseaux, nous avons présenté l'évolution récente des techniques de contrôle des micro-réseaux, en décrivant différentes définitions et structures de contrôle. Nous avons également expliqué le contrôle hiérarchique des micro-réseaux, en mettant en évidence les différents niveaux de contrôle (primaire, secondaire, tertiaire).

Le deuxième chapitre s'est concentré sur les convertisseurs DC/AC notamment appelés onduleurs. Une simulation sous Matlab/Simulink a été faite afin de valider le fonctionnement de l'onduleur avec la commande MLI et en présence du filtre LCL.

Dans le troisième chapitre, à partir de la littérature existante, nous avons proposé un contrôleur basé sur les régulateurs PI dans le repère dq. Cependant, nous avons souligné que le simple choix de cette méthode de contrôle n'est pas suffisant. Une étude détaillée des paramètres des régulateurs est nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal. Nous avons décrit les fonctions de transfert des deux boucles de régulation et avons proposé un contrôleur précisément adapté aux besoins de notre micro-réseau.

Enfin, le dernier chapitre a confirmé la fiabilité de notre contrôleur en termes de temps de réponse et de dépassement. Grâce à une sélection précise des paramètres de régulation, notre contrôleur s'est avéré robuste et efficace. Nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink sous différents scénarios de charge.

En résumé, notre travail a permis d'approfondir la compréhension des micro-réseaux et de proposer un contrôleur primaire fiable et performant. Les simulations ont démontré l'efficacité de notre approche dans diverses conditions de charge, tant linéaires que non linéaires. En soulignant l'importance du choix précis des paramètres de régulation pour un fonctionnement optimal du micro-réseau. Ces résultats contribuent à promouvoir l'utilisation des micro-

Conclusion Générale

réseaux comme solution alternative pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant l'environnement.

Cependant, il convient de souligner que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour perfectionner les systèmes de micro-réseaux, notamment en ce qui concerne l'optimisation du contrôle, la gestion de l'interconnexion et la coordination avec le réseau principal.

Annexes

ANNEXE A

$$v_{L.abc} + v_{r.abc} + v_{C.abc} = v_{inv.abc}$$

$$L_1 \frac{di_{L1.abc}}{dt} + r_1 i_{L1.abc} + v_{c.abc} - v_{inv.abc} = 0 \quad \text{avec} \quad v_{L.abc} = L_1 \frac{di_{L1.abc}}{dt} \quad \text{et} \quad v_{r.abc} = r_1 i_{L1.abc}$$

$$L_1 \frac{di_{L1.abc}}{dt} = -r_1 i_{L1.abc} - v_{c.abc} + v_{inv.abc}$$

$$\frac{di_{L1.abc}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1.abc} - \frac{1}{L_1} v_{c.abc} + \frac{1}{L_1} v_{inv.abc} \quad (A1)$$

$$v_{c.abc} = \frac{1}{C} \int i_{c.abc}$$

$$\frac{dv_{c.abc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{c.abc} \quad \text{avec} \quad i_{c.abc} = i_{L1.abc} - i_{L2.abc}$$

$$\frac{dv_{c.abc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{L1.abc} - i_{L2.abc})$$

$$\frac{dv_{c.abc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1.abc} - \frac{1}{C} i_{L2.abc} \quad (A2)$$

Donc on obtient le système d'équation sur le repère abc

$$\begin{cases} \frac{di_{L1.abc}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1.abc} - \frac{1}{L_1} v_{c.abc} + \frac{1}{L_1} v_{inv.abc} \\ \frac{dv_{c.abc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1.abc} - \frac{1}{C} i_{L2.abc} \end{cases} \quad (A3)$$

ANNEXE B

$$\begin{cases}
 \overline{X}_{abc} = \overline{X}_{dq} e^{j\vartheta_x} \\
 \overline{X}_{dq} = X_d + jX_q \quad \text{et avec } \vartheta_x = \int \omega_x dt \\
 \dot{\overline{X}}_{abc} = (\dot{\overline{X}}_{dq} + j\dot{\vartheta}_x \overline{X}_{dq}) e^{j\vartheta_x}
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \overline{i}_{L1 abc} = \overline{i}_{L1 dq} e^{j\vartheta_x} \rightarrow \frac{d\overline{i}_{L1 abc}}{dt} = \left(\frac{d\overline{i}_{L1 dq}}{dt} + J\omega_x \overline{i}_{L1 dq} \right) e^{j\vartheta_x} \\
 \overline{v}_{C abc} = \overline{v}_{C dq} e^{j\vartheta_x} \rightarrow \frac{d\overline{v}_{C abc}}{dt} = \left(\frac{d\overline{v}_{C dq}}{dt} + J\omega_x \overline{v}_{C dq} \right) e^{j\vartheta_x}
 \end{cases} \quad (B1)$$

Depuis les équations du repère abc on obtient :

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{d\overline{i}_{L1 dq}}{dt} + J\omega_x \overline{i}_{L1 dq} \right) e^{j\vartheta_x} &= \left(-\frac{r_1}{L_1} \overline{i}_{L1 dq} - \frac{1}{L_1} \overline{v}_{c.dq} + \frac{1}{L_1} \overline{v}_{inv.dq} \right) e^{j\vartheta_x} \\
 \left(\frac{d\overline{v}_{C dq}}{dt} + J\omega_x \overline{v}_{C dq} \right) e^{j\vartheta_x} &= \left(\frac{1}{C} \overline{i}_{L1 dq} - \frac{1}{C} \overline{i}_{L2 dq} \right) e^{j\vartheta_x}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 \frac{d\overline{i}_{L1 dq}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} \overline{i}_{L1 dq} - \frac{1}{L_1} \overline{v}_{c.dq} + \frac{1}{L_1} \overline{v}_{inv.dq} - J\omega_x \overline{i}_{L1 dq} \\
 \frac{d\overline{v}_{C dq}}{dt} = \frac{1}{C} \overline{i}_{L1 dq} - \frac{1}{C} \overline{i}_{L2 dq} - J\omega_x \overline{v}_{C dq}
 \end{cases} \quad (B2)$$

DONC de cela on fait le système d'équations final qui est :

$$\begin{cases}
 \frac{di_{L1d}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1,d} + \frac{1}{L_1} v_{inv,d} - \frac{1}{L_1} v_{C,d} + \omega_x i_{L1,q} \\
 \frac{di_{L1q}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1,q} + \frac{1}{L_1} v_{inv,q} - \frac{1}{L_1} v_{C,q} - \omega_x i_{L1,d} \\
 \frac{dv_{Cd}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1,d} - \frac{1}{C} i_{L2,d} + \omega_x v_{C,q} \\
 \frac{dv_{Cq}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1,q} - \frac{1}{C} i_{L2,q} - \omega_x v_{C,d}
 \end{cases} \quad (B3)$$

ANNEXE C

$$\bullet \quad \frac{di_{L1d}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1d} + \frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q}$$

On fait l'intégral de la dérive et on multiplie l'autre côté par $\frac{1}{s}$ on obtient

$$i_{L1d} = -\frac{r_1}{L_1 s} i_{L1d} + \frac{1}{L_1 s} v_{inv} - \frac{1}{L_1 s} v_{Cd} + \frac{1}{s} \omega_x i_{L1q}$$

On multiplier les deux côtés par s on obtient

$$i_{L1d} s = s \left(-\frac{r_1}{L_1 s} i_{L1d} + \frac{1}{L_1 s} v_{inv} - \frac{1}{L_1 s} v_{Cd} + \frac{1}{s} \omega_x i_{L1q} \right)$$

$$i_{L1d} s = -\frac{r_1}{L_1} i_{L1d} + \frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q}$$

$$i_{L1d} s + \frac{r_1}{L_1} i_{L1d} = +\frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q}$$

$$i_{L1d} \left(s + \frac{r_1}{L_1} \right) = +\frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q}$$

$$i_{L1d} \left(\frac{L_1 s + r_1}{L_1} \right) = +\frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q}$$

On multiplie les deux membres de l'équation par l'inverse de $\left(\frac{L_1 s + r_1}{L_1} \right)$ on obtient

$$i_{L1d} = \left(\frac{L_1}{L_1 s + r_1} \right) \left(\frac{1}{L_1} v_{inv} - \frac{1}{L_1} v_{Cd} + \omega_x i_{L1q} \right)$$

Enfinement on obtient
$$i_{L1d} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) (v_{inv} - v_{Cd} + L_1 \omega_x i_{L1q}) \quad (C1)$$

$$\bullet \quad \frac{di_{L1q}}{dt} = -\frac{r_1}{L_1}i_{L1q} + \frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}$$

on fait l'intégral de la dérive et on multiplie l'autre côté par $\frac{1}{s}$ on obtient

$$i_{L1q} = -\frac{r_1}{L_1 s}i_{L1q} + \frac{1}{L_1 s}v_{inv} - \frac{1}{L_1 s}v_{Cq} - \frac{1}{s}\omega_x i_{L1d}$$

On multiplier les deux côtés par s on obtient

$$i_{L1q}s = s\left(-\frac{r_1}{L_1}i_{L1q} + \frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \frac{1}{s}\omega_x i_{L1d}\right)$$

$$i_{L1q}s = -\frac{r_1}{L_1}i_{L1q} + \frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}$$

$$i_{L1q}s + \frac{r_1}{L_1}i_{L1q} = +\frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}$$

$$i_{L1q}\left(s + \frac{r_1}{L_1}\right) = +\frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}$$

$$i_{L1q}\left(\frac{L_1 s + r_1}{L_1}\right) = +\frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}$$

On multiplie les deux membres de l'équation par l'inverse de $\left(\frac{L_1 s + r_1}{L_1}\right)$ on obtient

$$i_{L1q} = \left(\frac{L_1}{L_1 s + r_1}\right)\left(\frac{1}{L_1}v_{inv} - \frac{1}{L_1}v_{Cq} - \omega_x i_{L1d}\right)$$

Finalement on obtient $i_{L1q} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1}\right)(v_{inv} - v_{Cq} - L_1 \omega_x i_{L1d})$ (C2)

$$\bullet \quad \frac{dv_{Cd}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1d} - \frac{1}{C} i_{L2d} + \omega_x v_{Cq}$$

On fait l'intégral de la dérive et on multiplie l'autre côté par $\frac{1}{s}$ on obtient

$$v_{Cd} = \frac{1}{Cs} i_{L1d} - \frac{1}{Cs} i_{L2d} + \frac{1}{s} \omega_x v_{Cq}$$

On multiplie les deux côtés par s on obtient

$$v_{Cd}s = \frac{1}{C} i_{L1d} - \frac{1}{C} i_{L2d} + \omega_x v_{Cq}$$

On multiplie les deux côtés par C on obtient

$$v_{Cd}Cs = i_{L1d} - i_{L2d} + C\omega_x v_{Cq}$$

On multiplie les deux membres de l'équation par l'inverse de $(\frac{1}{Cs})$ on obtient

$$\text{Finalement on obtient} \quad v_{Cd} = \left(\frac{1}{Cs}\right)(i_{L1d} - i_{L2d} + C\omega_x v_{Cq}) \quad (C3)$$

$$\bullet \quad \frac{dv_{Cq}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L1q} - \frac{1}{C} i_{L2q} + \omega_x v_{Cd}$$

On fait l'intégral de la dérive et on multiplie l'autre côté par $\frac{1}{s}$ on obtient

$$v_{Cq} = \frac{1}{Cs} i_{L1q} - \frac{1}{Cs} i_{L2q} + \frac{1}{s} \omega_x v_{Cd}$$

On multiplie les deux côtés par s on obtient

$$v_{Cq}s = \frac{1}{C} i_{L1q} - \frac{1}{C} i_{L2q} + \omega_x v_{Cd}$$

On multiplie les deux côtés par C on obtient

$$v_{Cq}Cs = i_{L1q} - i_{L2q} + C\omega_x v_{Cd}$$

On multiplie les deux membres de l'équation par l'inverse de $(\frac{1}{Cs})$ on obtient

$$\text{Finalement on obtient} \quad v_{Cq} = \left(\frac{1}{Cs}\right)(i_{L1q} - i_{L2q} + C\omega_x v_{Cd}) \quad (C4)$$

ANNEXE D

$$\begin{cases} i_{L1d} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv} - v_{Cd} + L_1\omega_x i_{L1q}) \\ i_{L1q} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv} - v_{Cq} - L_1\omega_x i_{L1d}) \end{cases} \quad (D1)$$

$$\begin{cases} i_{L1d} = \left[\frac{1}{L_1s + r_1}\right](v_{inv.d}^{Cont}) \\ i_{L1q} = \left[\frac{1}{L_1s + r_1}\right](v_{inv.q}^{Cont}) \end{cases}$$

On fait une hypothèse :

$$\begin{cases} v_{inv.d}^{Comp} = v_{Cd} - L_1 i_{L1.q} \\ v_{inv.q}^{Comp} = v_{Cq} - L_1 i_{L1.d} \end{cases}$$

On remplace les hypothèses dans l'équation (D1) on obtient :

$$\begin{cases} i_{L1.d} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv.d}^{Cont} + v_{inv.d}^{Comp}) \\ i_{L1.q} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv.q}^{Cont} + v_{inv.q}^{Comp}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L1.d} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv.d}^{act}) \\ i_{L1.q} = \left(\frac{1}{L_1s + r_1}\right)(v_{inv.q}^{act}) \end{cases} \quad (D2)$$

On va calculer $v_{inv.d}^{act}$ et $v_{inv.q}^{act}$

$$\begin{cases} v_{inv.d}^{act} = K_p (i_{L1.d}^{ref} - i_{L1.d}) + K_i \int (i_{L1.d}^{ref} - i_{L1.d}) dt \\ v_{inv.q}^{act} = K_p (i_{L1.q}^{ref} - i_{L1.q}) + K_i \int (i_{L1.q}^{ref} - i_{L1.q}) dt \end{cases}$$

Donc après les calculs on obtient :

$$\begin{cases} v_{inv.d}^{act} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{L1.d}^{ref} - i_{L1.d}) \\ v_{inv.q}^{act} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{L1.q}^{ref} - i_{L1.q}) \end{cases} \quad (D3)$$

On remplace (D2) dans (D3) on obtient :

$$\begin{cases} i_{L1.d} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{L1.d}^{ref} - i_{L1.d}) \\ i_{L1.q} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{L1.q}^{ref} - i_{L1.q}) \end{cases}$$

On fait le développement on obtient donc :

$$\begin{cases} i_{L1.d} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p i_{L1.d}^{ref} - K_p i_{L1.d} + \frac{K_i}{s} i_{L1.d}^{ref} - \frac{K_i}{s} i_{L1.d} \right) \\ i_{L1.q} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p i_{L1.q}^{ref} - K_p i_{L1.q} + \frac{K_i}{s} i_{L1.q}^{ref} - \frac{K_i}{s} i_{L1.q} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) K_p i_{L1.d} + \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \frac{K_i}{s} i_{L1.d} + i_{L1.d} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) K_p i_{L1.d}^{ref} + \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \frac{K_i}{s} i_{L1.d}^{ref} \\ \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) K_p i_{L1.q} + \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \frac{K_i}{s} i_{L1.q} + i_{L1.q} = \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) K_p i_{L1.q}^{ref} + \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \frac{K_i}{s} i_{L1.q}^{ref} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L1.d} \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + 1 \right) = i_{L1.d}^{ref} \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \\ i_{L1.q} \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + 1 \right) = i_{L1.q}^{ref} \left(\frac{1}{L_1 s + r_1} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L1.d} \left(\left(\frac{K_p}{L_1 s + r_1} + \frac{K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) + 1 \right) = i_{L1.d}^{ref} \left(\frac{K_p}{L_1 s + r_1} + \frac{K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \\ i_{L1.q} \left(\left(\frac{K_p}{L_1 s + r_1} + \frac{K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) + 1 \right) = i_{L1.q}^{ref} \left(\frac{K_p}{L_1 s + r_1} + \frac{K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L1.d} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} + 1 \right) = i_{L1.d}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \\ i_{L1.q} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} + 1 \right) = i_{L1.q}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L1.d} \left(\frac{K_p s + K_i + L_1 s^2 + r_1 s}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) = i_{L1.d}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \\ i_{L1.q} \left(\frac{K_p s + K_i + L_1 s^2 + r_1 s}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) = i_{L1.q}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{L_1 s^2 + r_1 s} \right) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L1.d} = i_{L1.d}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{K_p s + K_i + L_1 s^2 + r_1 s} \right) \\ i_{L1.q} = i_{L1.q}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{K_p s + K_i + L_1 s^2 + r_1 s} \right) \end{array} \right. \quad (D4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L1.d} = i_{L1.d}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{\frac{K_p s}{L_1} + \frac{K_i}{L_1} + s^2 + \frac{r_1 s}{L_1}} \right) \\ i_{L1.q} = i_{L1.q}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{\frac{K_p s}{L_1} + \frac{K_i}{L_1} + s^2 + \frac{r_1 s}{L_1}} \right) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L1.d} = i_{L1.d}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \left(\frac{K_p + r_1}{L_1} \right) s + \frac{K_i}{L_1}} \right) \\ i_{L1.q} = i_{L1.q}^{ref} \frac{1}{L_1} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \left(\frac{K_p + r_1}{L_1} \right) s + \frac{K_i}{L_1}} \right) \end{array} \right.$$

ANNEXE E

$$\begin{cases} v_{Cd} = \left(\frac{1}{C_S}\right)(i_{L1d} - i_{L2d} + C\omega_x v_{Cq}) \\ v_{Cq} = \left(\frac{1}{C_S}\right)(i_{L1q} - i_{L2q} + C\omega_x v_{Cd}) \end{cases} \quad (E1)$$

$$\begin{cases} v_{Cd} = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1d}^{cont}] \\ v_{Cq} = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1q}^{cont}] \end{cases}$$

On fait des Hypothèse :

$$\begin{cases} i_{L1d}^{comp} = i_{L2d} - C\omega_x v_{Cq} \\ i_{L1q}^{comp} = i_{L2q} - C\omega_x v_{Cd} \end{cases}$$

On remplace les hypothèses dans l'équation (E1) on obtient :

$$\begin{cases} v_{Cd} = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1d}^{cont} + i_{L1d}^{comp}] = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1d}^{act}] \\ v_{Cq} = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1q}^{cont} + i_{L1q}^{comp}] = \left[\frac{1}{C_S}\right][i_{L1q}^{act}] \end{cases} \quad (E2)$$

On va calculer i_{L1d}^{act} et i_{L1q}^{act} :

$$\begin{cases} i_{L1d}^{act} = K_P(v_{Cd}^{ref} - v_{Cd}) + K_i \int (v_{Cd}^{ref} - v_{Cd}) dt \\ i_{L1q}^{act} = K_P(v_{Cq}^{ref} - v_{Cq}) + K_i \int (v_{Cq}^{ref} - v_{Cq}) dt \end{cases}$$

Donc après les calculs on obtient :

$$\begin{cases} i_{L1d}^{act} = \left(K_P + \frac{K_i}{s}\right)(v_{Cd}^{ref} - v_{Cd}) \\ i_{L1q}^{act} = \left(K_P + \frac{K_i}{s}\right)(v_{Cq}^{ref} - v_{Cq}) \end{cases} \quad (E3)$$

On remplace (E2) dans (E3) on obtient :

$$\begin{cases} v_{Cd} = \left[\frac{1}{C_S}\right]\left[\left(K_P + \frac{K_i}{s}\right)(v_{Cd}^{ref} - v_{Cd})\right] \\ v_{Cq} = \left[\frac{1}{C_S}\right]\left[\left(K_P + \frac{K_i}{s}\right)(v_{Cq}^{ref} - v_{Cq})\right] \end{cases}$$

On fait le développement on obtient donc :

$$\begin{cases} v_{Cd} \left[\left(\frac{1}{Cs} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + 1 \right] = v_{Cd}^{ref} \left[\left(\frac{1}{Cs} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \right] \\ v_{Cq} \left[\left(\frac{1}{Cs} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + 1 \right] = v_{Cq}^{ref} \left[\left(\frac{1}{Cs} \right) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \right] \end{cases}$$

Après le développement de la dernière équation on obtient donc :

$$\begin{cases} v_{Cd} \left(\frac{K_p s + K_i + Cs^2}{Cs^2} \right) = v_{Cd}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{Cs^2} \right) \\ v_{Cq} \left(\frac{K_p s + K_i + Cs^2}{Cs^2} \right) = v_{Cq}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{Cs^2} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{Cd} = v_{Cd}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{Cs^2} \right) \left(\frac{Cs^2}{K_p s + K_i + Cs^2} \right) \\ v_{Cq} = v_{Cq}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{Cs^2} \right) \left(\frac{Cs^2}{K_p s + K_i + Cs^2} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{Cd} = v_{Cd}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{K_p s + K_i + Cs^2} \right) \\ v_{Cq} = v_{Cq}^{ref} \left(\frac{K_p s + K_i}{K_p s + K_i + Cs^2} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{Cd} = v_{Cd}^{ref} \frac{1}{C} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C}} \right) \\ v_{Cq} = v_{Cq}^{ref} \frac{1}{C} \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C}} \right) \end{cases} \quad (E4)$$

Bibliographie

- [1] **Benoît Robyns et Arnaud Davingny** dans son livre (stockage d'énergie électrique pour les bâtiments au sein de réseaux intelligents)
- [2] **Myriam el Andaloussi et Farah Fejjari et Annie Blandin** dans son livre (Concurrence et régulation - Etude sur l'interopérabilité des réseaux sociaux)
- [3] **Fouad Sabri** dans son livre grille intelligente (échange d'électricité et d'information entre les maisons et les centrales électrique)
- [4]: Peter Asmus, The Microgrid Revolution, In: RENEWABLE ENERGY RESILIENT ANOGRIDS, MICROGRIDS AND VIRTUAL POWER PLANTS, [en ligne], Navigant Research, 6 novembre 2009
- [5] Iris Fostiez, Johan De Bruyn et Sofie Brouw, tout sur l'énergie Bruxelles. Une initiative de Sibelga, Energide.be, (En ligne) (2009, 4 avril 2018).
- [6] NAKOUL Zakia, «Optimisation d'une centrale solaire a base d'un générateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] »
- [7] DR. BELAID LALOUNI SOFIA, Cours Energie Solaire Photovoltaïque
- [8] site web commission de régulation de l'énergie
- [9] J. He, Y. W. Li, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg and J. C. Vasquez, "An Islanding Microgrid Power Sharing Approach Using Enhanced Virtual Impedance Control Scheme," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 11, pp. 5272-5282, Nov. 2013.
- [10] A. Hossam, M. Gaber, and X. Dianguo, "A new optimal robust controller for frequency stability of interconnected hybrid microgrids considering non-inertia sources and uncertainties," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Jan. 2021, 106651, 10.1016/j.ijepes.2020.106651.
- [11] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, A. Luna, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, "Adaptive Droop Control Applied to Voltage-Source Inverters Operating in Grid-Connected and Islanded Modes," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 10, pp. 4088-4096, Oct. 2009.
- [12] Y. A. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation

Microgrids," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 6, pp. 2806-2816, Nov. 2008.

[13] T. Lee and P. Cheng, "Design of a New Cooperative Harmonic Filtering Strategy for Distributed Generation Interface Converters in an Islanding Network," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1919-1927, Sept. 2007

[14] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no.4, pp. 1107-1115, July 2007.

[15] Iris Fostiez, Johan De Bruyn et Sofie Brouw, tout sur l'énergie Bruxelles. Une initiative de Sibelga, Energuid.be, (En ligne) (2009, 4 avril 2018).

[16] Daniel Cadilla (Azimut 360), Mireia Gil (Azimut 360), Cristian Ros (Azimut 360), Cristina Gil (Azimut 360), Nicola Bugati (ECREEE), **Micro-réseaux photovoltaïques hybrides**, Tomaison, [en ligne], Plaça del Guinardó, 12, Local 1 - 08041 Barcelona, Juillet 2017, 124pages, (Titre de la collection, n° de la collection), pdf.

[18]A. El Moubarak Bouzid, 'Elaboration d'une méthode de contrôle pour améliorer la robustesse d'un micro réseau électrique, 'thèse présentée à l'université du Québec à Trois-Rivières, p22, juillet 2017

[19] John Stevens. "Characterization of Micro-grids in the United States", Sandia National Laboratories (January 2005)

[20] "Why the Micro-grid Could Be the Answer to Our Energy Crisis"

[21] commission de régulation de l'énergie

[22] A.Chouder , A. Malek et F. Krim , Modèle de Simulation d'une Commande en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Triphasé; Laboratoire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables. Laboratoire d'Electronique de Puissance, Université Ferhat Abbas, Sétif, 1999.

[23] Onduleurs (UPS) | Schneider Electric France » [archive], sur www.se.com (consulté le 5 mars 2021)

[24] Violaine Didier, Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques, Fonctionnement, État de l'Art et Étude des Performances [archive], photovoltaïque.info, 2007

[25] M. Correvon, Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue (Convertisseur U) [archive], Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

[26] - Benadel Hani Choudira MESSAOUD, technique de commande d'un onduleur triphasé, projet de fin d'étude licence génie électrique.

[27] Turner, R., Walton, S., Duke, R.: Stability and bandwidth implications of digitally controlled grid-connected parallel inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57**(11), 3685–3694 (2010)

[28] Wang, X., Guerrero, J.M., Blaabjerg, F., Chen, Z.: A review of power electronics based microgrids. *J. Power Electron.* **12**(1), 181–192 (2012).