

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA Béjaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## *Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master*

*Spécialité : électrotechnique*

*Option : Réseaux électriques*

## *Thème*

*Stabilité des micro réseaux électriques alimentés en  
courant alternatif*

**Présenté par :**  
**AIT HAMOUDI HANI**  
**AIT MOUHOUB AMIRA**

**Encadré par:**  
**Mr: M. BOUTEBEL**

Soutenu le:

Devant le jury composé de:

**Mme : F. LATRI, Présidente**

**Mr. M. BOUTEBEL , Rapporteur**  
**Mr : HARZINE, Examineur**

**Année universitaire**  
**2021/2022**

## REMERCIEMENTS

*Ce travail a été réalisé au sein de L'université Abderrahmane Mira Bejaïa*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier DIEU le tout puissant de nous avoir accordé santé et courage pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement messieurs les membres du jury d'avoir consacré de leurs temps à la lecture de ce manuscrit, et d'accepter de juger et d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre promoteur Mr **BOUTEBEL Mohamed**, pour sa démarche et son exigence scientifique qui nous ont permis de prendre de bonnes leçons pour la suite de notre parcours. Il a été le garant des orientations de ce travail.*

*Nous remercions nos familles et nos amis pour leur aide, soutien et encouragement durant notre cursus universitaire, ainsi que toute personne ayant participé de près ou de loin dans notre formation et à tous ceux qui nous ont soutenus depuis le début pour arriver là où nous sommes aujourd'hui.*

## *Dédicaces*

*Ce travail est dédié à mon très cher père, grand symbole de force et de courage. A la personne la plus chère à mon cœur, ma mère car c'est grâce à son soutiens que j'ai pu arriver à ce stade ; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi.  
A mes très chers frères et sœurs et ma famille*

*Une spéciale dédicace pour mes meilleures amies : Nadjet, Kahina, Tassadit, Narimene  
Sans oublier toutes personnes qui me connaissent de loin ou de près, en particulier : la classe  
de M2 Réseaux électriques.*

**AIT MOUHOUB AMIRA**

A mes frères, mes parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours. A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité

**AIT HAMOUDI HANI**

### **Liste des tableaux**

**Tableau III .1 :** Les caractéristiques des différents types de problèmes de stabilités dans les micro-réseaux.

**Tableau III.2 :** Comparaison des méthodes de control basées sur la communication des micro-réseaux alimentés par un courant alternatif.

**Tableau. IV.1 :** Les valeurs des différents paramètres de simulation.

**Tableau. IV.2 :** Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors cas sans perturbation.

**Tableau. IV.3 :** Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de la variation du gain de statisme de la puissance active MP.

**Tableau. IV.4 :** Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de variation de puissance réactive  $M_q$ .

**Tableau. IV. 5 :** Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de la variation de la charge RL.

**Tableau. IV. 6 :** Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de la variation de la charge RL.

## **Liste des figures**

**Figure I.1 :** Les micro-réseaux et le réseau électrique principal.

**Figure I.2 :** Architecture type d'un micro-réseau AC.

**Figure I.3 :** Configuration d'un micro-réseau DC.

**Figure I.4 :** Exemple de circuit avec une architecture single bus bipolaire.

**Figure I.5 :** Exemple de circuit avec architecture single bus mono polaire.

**Figure I.6 :** Exemple de micro-réseau basé sur une topologie multi-terminal.

**Figure I.7 :** Architecture hybride (AC possédant une sous-section DC).

**Figure II.1 :** Onduleur triphasé alimentant un moteur avec neutre isolé.

**Figure II.2 :** Schéma fonctionnel du contrôleur de puissance.

**Figure II.3 :** Schéma fonctionnel du contrôleur de tension.

**Figure II.4 :** Schéma fonctionnel du régulateur de courant.

**Figure II.5 :** Modèle pour la PLL.

**Figure III .1 :** Classification de la stabilité dans les micro-réseaux.

**Figure III .2 :** DER connecté au micro-réseau.

**Figure IV.1 :** Schéma électrique du micro-réseau.

**Figure IV.2 :** Montage globale de simulation.

**Figure IV. 3 :** Variation de la fréquence en fonction du temps sans perturbation.

**Figure IV.4 :** Variation de l'intensité du courant des lignes en fonction du temps sans perturbation.

**Figure IV.5 :** Variation de l'intensité du courant des charges en fonction du temps sans perturbation.

**Figure IV.6 :** Variation de l'intensité des courants de convertisseur en fonction du temps sans perturbation.

**Figure IV.7 :** Variation des tensions en fonction du temps sans perturbation.

**Figure IV.8 :** Influence de la variation du gain de statisme de puissance  $M_p$  sur la fréquence.

**Figure IV.9 :** Influence de la variation du gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de la ligne.

**Figure IV.10 :** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de la charge.

**Figure IV.11 :** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de convertisseur.

**Figure IV.12 :** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur la tension.

**Figure IV.13 :** Influence de la variation du gain de statisme de puissance réactive  $M_q$  sur la fréquence.

**Figure IV.14 :** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de la ligne.

**Figure IV.15 :** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de la charge.

**Figure IV.16 :** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de convertisseur.

**Figure IV.17 :** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur la tension.

**Figure IV.18 :** Influence de la charge RL sur la fréquence.

**Figure IV.19 :** Influence de la charge RL sur l'intensité du courant de la ligne.

**Figure IV.20 :** Influence la charge RL sur l'intensité du courant de la charge.

**Figure IV.21 :** Influence de la charge RL sur l'intensité du courant de convertisseur.

**Figure IV.22 :** Influence de la charge RL sur la tension.

**Figure IV.23.** La variation multiple de la charge en fonction de temps.

**Figure IV.24 :** Influence de multi charge sur la fréquence.

**Figure IV.25 :** Influence de multi charges sur l'intensité du courant de la ligne.

**Figure IV.26 :** Influence multi charges sur l'intensité du courant de la charge.

**Figure IV.27 :** Influence de multi charges sur l'intensité du courant de convertisseur.

**Figure IV.28 :** Influence de multi charges sur la tension.

**Liste des symboles**

|            |       |  |
|------------|-------|--|
| $\delta$   | rad   | l'angle de tension                           |
| P          | W     | La puissance active                          |
| F          | Hz    | Fréquence                                    |
| Q          | VAR   | La puissance réactive                        |
| m          |       | Le coefficients de statisme actif et réactif |
| n          |       | Le coefficients de statisme réactif          |
| Wref       | rad\S | La vitesse angulaire nominale                |
| Eref       | V     | La tension nominale                          |
| $mp$       |       | La pente de statisme actif                   |
| $nq$       |       | La pente de statisme réactive                |
| Kpc        | -     | Le gain proportionnels du courant            |
| Kic        | -     | Le gain intégrateur du courant               |
| kpu        | -     | Le gain proportionnels de la tension         |
| kiu        | -     | le gain intégrateur de la tension            |
| G          | -     | Le gain de commande prédictif                |
| $\delta'$  | -     | Erreur de courant découplée                  |
| $\delta''$ | -     | Terme de découplage                          |
| WC         | rad\s | La pulsation de coupure du filtre passe –bas |

## **Liste d'abréviation**

DC : courant continu – direct current

AC : courant alternatif

PCC : point de couplage commun

WSP : washington state patrol

CMS : contrôleur de micro source

CGM : contrôleur général du micro-réseau

CSS : contrôleur de système de stockage

SAM : système automatisé de mesure

HVDC : haute tension DC

CSDC : contrôleur de section-DC

VSI : onduleur de source de tension

PLL : boucle a verrouillage de phase

CC : central control

DG : distributed génération

Facts : flexible AC transmission systèms

SER : source d'énergie renouvelable

MGCC : control en central de micro réseau

PEC : convertisseur électronique de puissance

VSC : voltage source converter

DER : ressources énergétiques distribuées

AC, DC : alternatif continu



## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <u>Introduction générale :</u> .....   | 1  |
| <u>Chapitre I : généralité les micro- réseaux</u> .....  | 2  |
| <u>I. Introduction</u> .....   | 2  |
| <u>I.2 Micro-réseau</u> .....  | 2  |
| I.2.1 Qu'est-ce qu'un micro-réseau ?.....  | 3  |
| I.2.2 Les modes d'un micro-réseau .....  | 3  |
| <u>I.2.2.1 Micro-réseau ilote</u> .....  | 3  |
| <u>I.2.2.2 Micro-réseau connecté ;</u> .....   | 4  |
| I.2.3Avantages et inconvénients des micro-réseaux ; .....  | 5  |
| <u>I.2.3.1 Avantage ;</u> .....  | 5  |
| <u>I.2.3.2 Inconvénients :</u> .....   | 5  |
| I.2.4 Architecture fonctionnelle des micro-réseaux ; .....   | 5  |
| - <u>I.2.4.1 Les micro-réseaux de type AC (Courant Alternatif) ;</u> .....   | 5  |
| <u>I.2.4.2 Les micro-réseaux de type DC (Courant Continu) ;</u> .....  | 7  |
| <u>I.2.4.2 .1Single Bus ;</u> .....  | 8  |
| <u>I.2.4.2 .2 ; Multi terminaux ;</u> .....  | 10 |
| <u>I.2.4.3 Les micro-réseaux hybrides (AC/DC) ;</u> .....  | 11 |
| <u>I.3 les réseaux électriques du future ; vers dés réseaux électriques</u><br><u>décentralisés intelligents surs et fiable « Smart Grid » ;</u> ..... | 12 |
| I.3 .1 Quels objectifs un réseau de distribution intelligent permet-il d'atteindre ; .....   | 13 |
| <u>I.3 .1.2 objectifs techniques ;</u> .....   | 13 |
| <u>Conclusion :</u> .....  | 14 |
| <u>Chapitre II : modélisation des micro- réseaux</u> .....   | 15 |
| <u>INTRODUCTION</u> .....  | 15 |
| <u>II.1 Onduleur de source de tension (VSI) ;</u> .....  | 16 |
| II.1.1modilisation du contrôleur de puissance ; .....  | 18 |
| II.1.2 modèle de contrôleur de tension ; .....   | 19 |
| II.1.3 modèle de contrôleur de courant ; .....   | 21 |

|   |           |
|---|-----------|
| II.1.4.modèle de filtre LC et d'inductance de couplage :  | 22        |
| II.1.2 Système de boucle à verrouillage de phase PLL :  | 23        |
| <b><u>Conclusion</u></b> .....  | <b>24</b> |
| <b><u>Chapitre III : stabilité des micro- réseaux</u></b> .....   | <b>25</b> |
| <b><u>III.1Définition et classification de la stabilité dans les micro- réseaux</u></b> :.....                      | <b>25</b> |
| <b><u>III 1.1Définition</u></b> :.....  | <b>25</b> |
| <b><u>III1 .2 classification</u></b> :.....   | <b>27</b> |
| <b><u>III.2 Alimentation et stabilité de l'équilibre</u></b> :.....   | <b>27</b> |
| III.2 .1 Stabilité de la fréquence :.....   | 28        |
| III.2 .2 stabilité de tension : .....   | 28        |
| <b><u>III.2.2.1 Manque local d'énergie réactive</u></b> :   | 29        |
| <b><u>III.2.2.2 Charge appelée trop importante</u></b> :  | 29        |
| III.2 .3 contrôle de la stabilité du système :.....   | 29        |
| <b><u>III.2 .3.1 Stabilité de la machine électrique</u></b> :   | 30        |
| <b><u>III.2 .3.2 Stabilité du convertisseur</u></b> :   | 30        |
| <b><u>III.2 .4 Grandes vs Petites perturbations</u></b> :   | 30        |
| <b><u>III.2 .5 Contrôle et stabilité des micro-réseaux AC</u></b> :.....  | <b>32</b> |
| III.2 .5.1 Schéma de contrôle hiérarchique :.....   | 32        |
| <b><u>III.2 .5.1.1 Commande primaire</u></b> :.....   | 32        |
| <b><u>III.2 .5.1.2 Commande secondaire</u></b> :.....   | 32        |
| <b><u>III.2 .5.1.3 Commande tertiaire</u></b> :.....  | 33        |
| <b><u>III.2 .6 schéma de contrôles basés sur la communication</u></b> :.....  | <b>33</b> |
| III.2 .6.1 Schéma de contrôle centralisé :.....   | 33        |
| III.2 .6.2 Schéma de contrôle distribué : .....   | 33        |
| <b><u>III.2 .7 Techniques de contrôles basés sur le drop</u></b> :.....   | <b>34</b> |
| III.2 .7.1 Contrôle d'attaque conventionnel :.....  | 35        |
| III.2 .7.2 Tension puissance active (vpd) et contrôle de statisme de puissance réactive en<br>fréquence(FQD) :..... | 36        |
| III.2 .7.3 Contrôle d'angle :.....  | 37        |
| <b><u>Conclusion</u></b> .....  | <b>37</b> |
| <b><u>Chapitre IV</u></b> .....   | <b>38</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b><u>Simulation et analyse de cas pratique</u></b> .....                         | <b>38</b> |
| <b><u>Introduction</u></b> .....  | <b>38</b> |
| <b><u>IV.1. Schéma électrique du micro-réseau à étudier</u></b> .....             | <b>38</b> |
| <b><u>IV.2. Simulation du système global avec MATLAB</u></b> .....                | <b>40</b> |
| <b><u>IV.3. Résultats de simulation</u></b> .....                                 | <b>41</b> |
| IV. 3 .1. <u>Sans perturbation</u> :.....   | 41        |
| IV. 3 .2. <u>Variation du gain de statisme de la puissance active (Mp)</u> :..... | 46        |
| IV. 3 .1. <u>Variation du gain de statisme de puissance réactive (Mq)</u> :.....  | 50        |
| IV. 3. <u>Influence de la variation de la charge RL</u> :.....                    | 55        |
| IV. 4. <u>Influence de la variation de multiple charges RL</u> : .....            | 60        |
| <b><u>Conclusion</u></b> .....  | <b>65</b> |
| <b><u>Conclusion générale</u> :</b> .....   | <b>66</b> |

### **Introduction générale :**

Les investissements humains et matériels affectés aux réseaux électriques sont énormes. Pour cela, le réseau électrique doit répondre à trois exigences essentielles : stabilité, économie et surtout continuité de service.

Un rapport du cabinet de conseil américain, Navigant Research indique que le marché des microgrids, ou micro-réseaux électriques intelligents, augmentera de près de 30 milliards de dollars d'ici 2021, passant de 10 milliards en 2013 à 40 milliards en 2021. Dans le monde, plus de 400 projets représentant plus de 3,2 GWh d'électricité sont en cours de développement ou déjà opérationnels. Et le nombre de ces projets devrait quadrupler d'ici 2021.

La raison principale de cette forte augmentation du nombre de projets réside dans la volonté de rapprocher la production d'électricité de sa consommation, de limiter les investissements dans les réseaux de transport et de distribution et de réduire les pertes. Et cela est aujourd'hui rendu possible par la multiplication des installations de production d'énergie décentralisées, solaires ou éoliennes et le développement des dispositifs de stockage. D'autres raisons président également à ce boom des projets de micro-grids, notamment aux États-Unis et en Asie, leaders en nombre de projets dans le monde, comme la volonté d'augmenter la résilience du système électrique en faisant appel à la capacité d'îlotage qu'offrent les micro-grids. Les micro-grids constituent un modèle d'optimisation pour le réseau électrique

Le travail de ce mémoire de fin d'étude est consacré à l'étude de stabilité d'un micro-grid avec un courant alternatif et ces différentes simulations ont été faites à l'aide de logiciel MATLAB, et une discussion des résultats obtenus.

# Chapitre I : Généralités sur les micro-réseaux

## I. Introduction

Dans certaines régions du monde, coupées de tout et particulièrement défavorisées en matière d'infrastructures, l'électrification rurale est réellement un besoin très, important pour toute la population, et un enjeu vital qui a une répercussion sur le développement d'un pays tout entier. En effet, concrètement, plus de 10% de-là population mondiale n'a toujours pas accès à l'électricité et éprouve les pires difficultés à s'approvisionner en énergie.

Parallèlement à cela, la tendance internationale actuelle, en pleine d'amélioration, des problèmes climatiques et en proie à différentes pressions, cherche de plus en plus à se diriger vers un développement durable.

L'utilisation croissante des énergies renouvelables rend aujourd'hui ce type de marché particulièrement attractif et prometteur, intéressant économiquement et financièrement. La création et la mise en place de micro-réseaux semble donc être une solution pertinente pour pallier les difficultés d'une distribution classique qui n'arrive pas à atteindre ses objectifs, ni certaines zones d'habitat ou d'activité industrielle. C'est pour ces raisons que la recherche fondamentale sur le sujet s'est considérablement accentuée ces dernières années, et de plus en plus d'études, tant scientifiques qu'économiques, vont désormais dans ce sens.

D'autre part, la question de l'avantage de l'utilisation du courant alternatif par rapport au courant continu est de plus en plus d'actualité, et fait son grand retour au cœur des débats. Depuis le 19e siècle, les réseaux AC sont utilisés dans le monde et privilégiés par rapport au DC. Ce choix a été fait pour des raisons de transport d'électricité sur de longues distances, qui se font à haute tension. Or, historiquement, il était bien plus facile d'élever la tension en AC avec la technologie de l'époque, alors qu'en DC, le changement de tension amenait plus de pertes et des tensions maximales moins élevées. Aujourd'hui, le gros avantage de l'AC tient principalement aux années d'expérience qui font que les normalisations, le contrôle de la stabilité et de la qualité ainsi que de la protection en AC sont bien connus et très efficaces en comparaison au DC.[1]

Dans ce chapitre, nous allons présenter le micro-réseau. Puis nous détaillerons le micro réseau et on va donner quelques aperçus générales sur les réseaux électriques intelligents.

## I.2 Micro-réseau

### **I.2.1 Qu'est-ce qu'un micro-réseau ?**

Un réseau électrique est un système complexe. L'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmement difficiles. Déployer une stratégie de contrôle globale sur le réseau électrique actuel s'avère être un véritable défi. Une solution serait de décomposer le réseau en sous-réseaux interconnectés, appelés les micro-réseaux ou microgrid. Un micro-réseau peut être défini comme étant un système d'énergie comprenant de producteurs d'énergie distribuée, de multiples charges électriques et des systèmes de stockage. Ils peuvent être exploités en étant connectés à d'autres réseaux (ou au réseau principal) ou sans aucun apport d'énergie de l'extérieur.

Un micro-réseau électrique permet une meilleure gestion de l'énergie circulant dans le réseau en limitant ses pertes, en favorisant la communication entre les différentes entités qui le constituent et en permettant une gestion optimisée de la production d'électricité d'origine renouvelable à l'échelle locale. Il peut être considéré comme un petit réseau de distribution décentralisé qui alimente un petit nombre d'utilisateurs en transportant donc de faibles puissances électriques. [2]

La particularité qui fait du micro-réseau l'une des solutions les plus étudiée dans le domaine de l'énergie est sa capacité à s'iloter du réseau principal, soit pour des raisons économiques, soit pendant un blackout ou une perturbation. De cette particularité naissent deux grandes familles, micro-réseau avec des fonctionnements et des objectifs très différents : les micro-réseaux connectés et les micro- réseaux ilotes. [3]

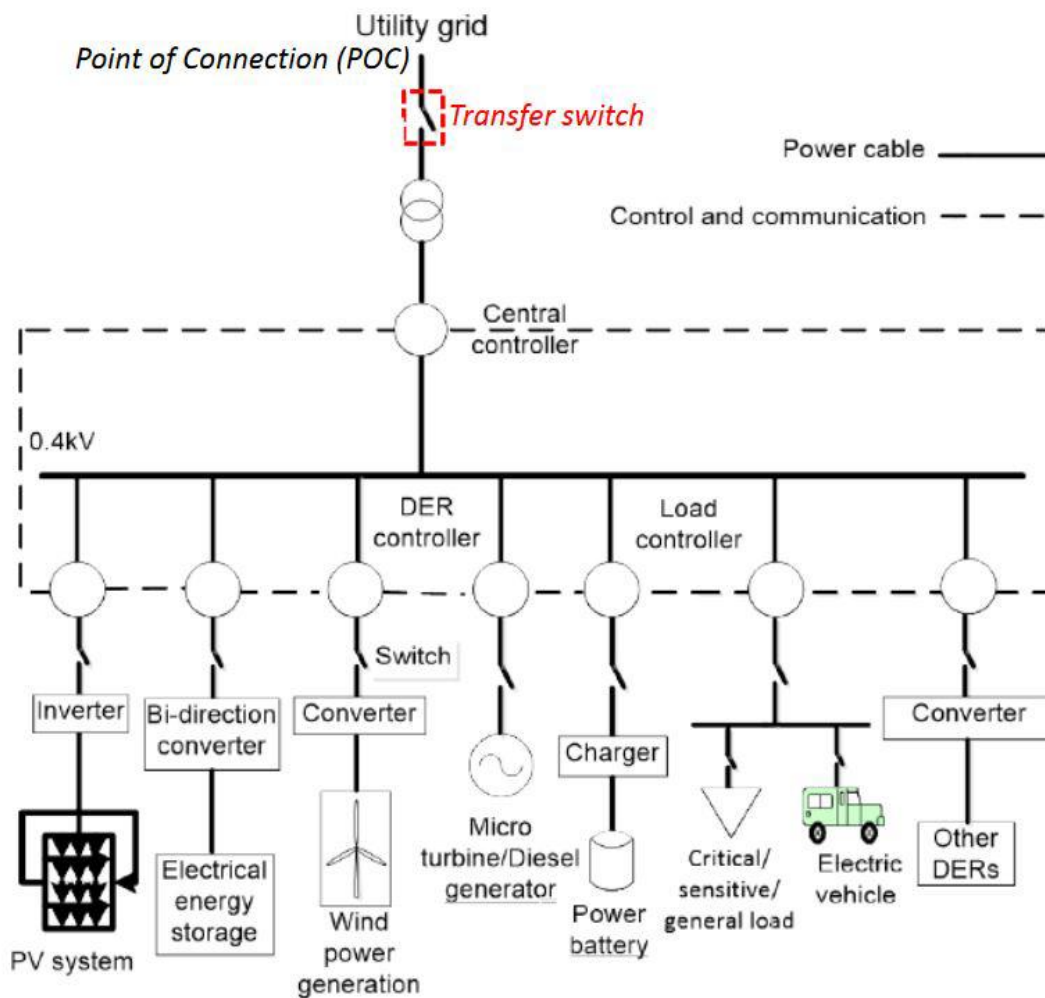
### **I.2.2 Les modes d'un micro-réseau**

#### **I.2.2.1 Micro-réseau ilote**

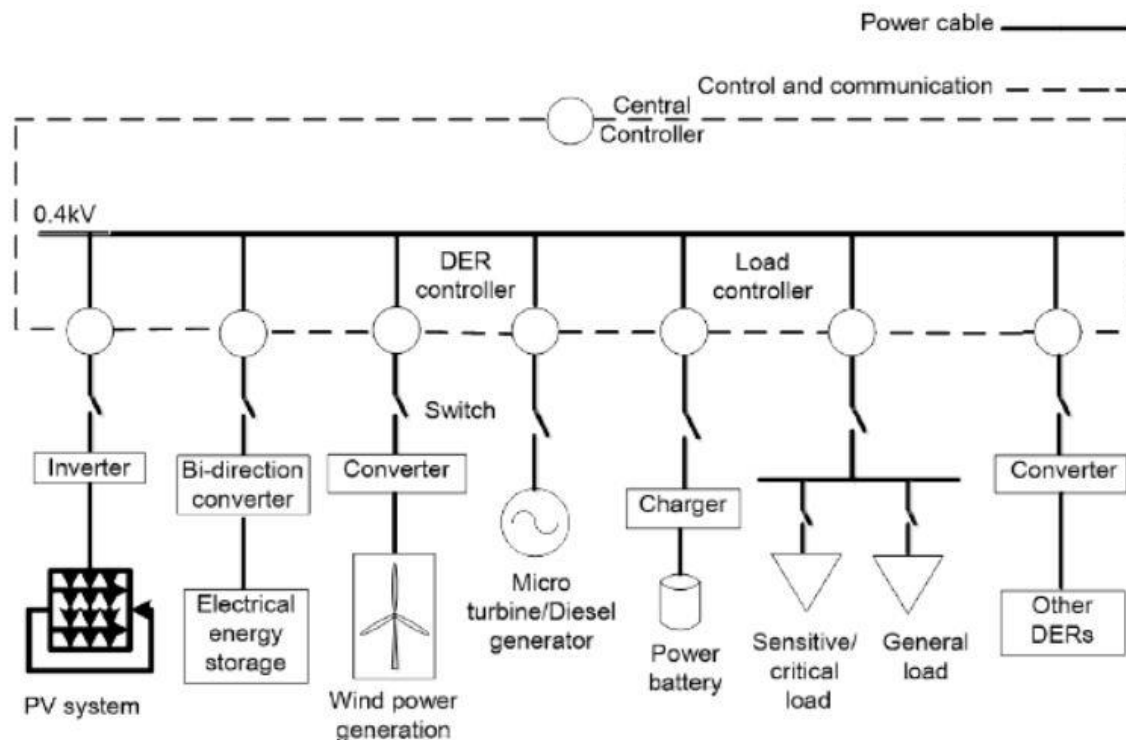
Les micros réseaux en mode ilote sont des micro-réseaux isolés, permettent comme leur nom l'indique, ne sont pas reliés à un réseau plus robuste. Ils doivent donc assurer seuls leur gestion d'énergie, leur protection ainsi que leur contrôle. Ces micro-réseaux sont aussi et surtout en plein développement dans les pays émergents, car ils de desservir en électricité des populations n'ayant actuellement pas accès à l'électricité. Ceux-ci sont d'autant plus intéressants dans les pays du sud au vu de leurs ressources en énergies renouvelables abondantes. [3]

I.2.2.2 Micro-réseau connecté ;

Les micros réseaux connectés sont directement reliés au réseau local de distribution d'électricités du pays, ils ont l'avantage de pouvoir produire de l'électricité du réseau électrique local ou on peut le définir comme une (ou plusieurs) connexion(s) avec le réseau principal appelée PPC (Point of Common Coupling = Point de Couplage Commun) avec un commutateur connexion/déconnexion. [3]



Connectés



(b) isolés

Figure I.1 : Les micro-réseaux et le réseau électrique principal.

### I.2.3 Avantages et inconvénients des micro-réseaux ;

Parmi les avantages et les inconvénients que nous pouvons rencontrer, nous avons :

#### I.2.3.1 Avantage ;

1. Les micro-réseaux sont la nouvelle tendance en électrification, Ils permettent d’atteindre les lieux les plus reculés, là où les grands réseaux ne peuvent pas se rendre et d’offrir un service plus fiable, plus propre et moins cher que dans les régions déjà desservies par les réseaux centraux.

2. économisé grâce aux micro- réseaux ;

En raison de ses capacités, certains comparent le micro réseau a un chef d’orchestre. Le projet Lancé à Livermore, en Californie, en est un bon exemple conçu par WSP, le micro réseau de LAS POSITAS COLLEGE gère la production d’énergie solaire en utilisant deux modes de stockage ; un système à batteries qui emmagasine l’énergie électrique et un système à glace qui emmagasine l’énergie thermique.



3. Atteindre l'équilibre offre-demande.
4. Amélioration de la puissance et de la fiabilité
5. Faire face à la pollution environnementale.

**I.2.3.2 Inconvénients :**

1. Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées.
2. Difficultés techniques liés au manque d'expérience technique.
3. Absence de normes : puisque c'est un domaine relativement nouveau, les normes ne sont pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection.
4. Absence de lois ou règlement standard pour réguler le fonctionnement des micro-réseaux.[4]

**I.2.4 Architecture fonctionnelle des micro-réseaux ;**

Il y'a trois principales architectures de micro-réseaux :

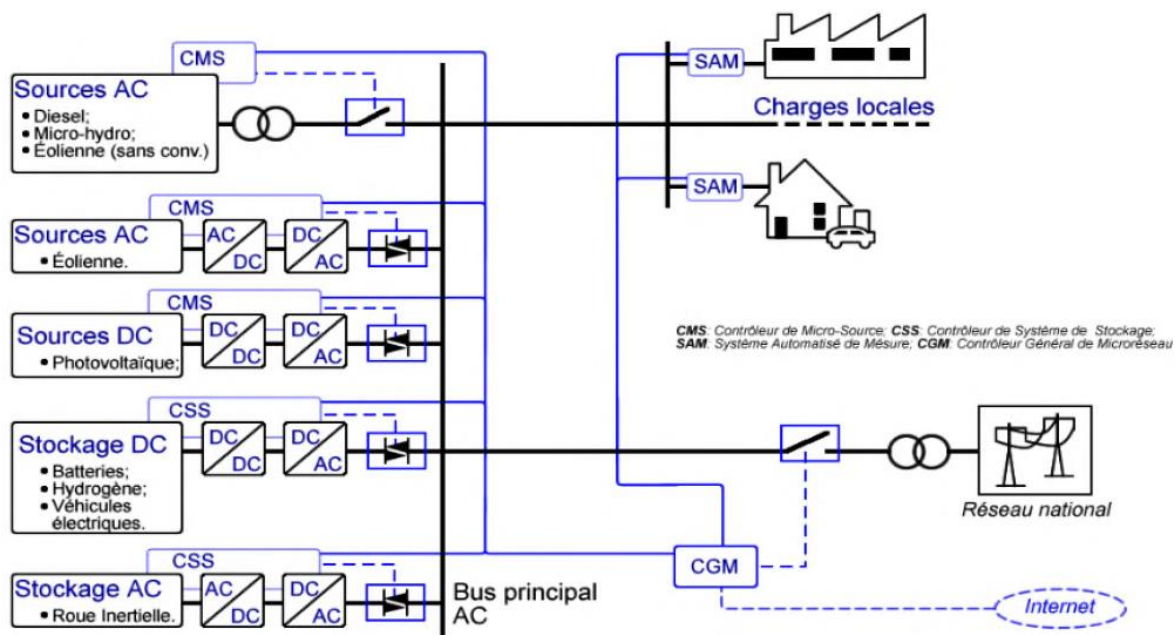
**I.2.4.1 Les micro-réseaux de type AC (Courant Alternatif) ;**

Le courant alternatif s'est imposé comme le mode de transmission le plus utilisé dans le monde, notamment de par la facilité avec laquelle il est produit (au moyen de machines, tournantes utilisant des énergies fossiles) ainsi que par sa faculté à être transporté sur de longues distances.

Ces architectures tirent avantage de l'infrastructure déjà existante (disjoncteurs, transformateurs, génératrices synchrones, etc.) des réseaux AC classiques. Ainsi, les sources traditionnelles telles que le diesel et l'hydroélectrique sont directement connectées au bus principal de transfert d'énergie et constituent la base du micro-réseau. Les sources renouvelables sont intégrées graduellement pour réduire la part des sources les plus polluantes et nécessitent en générale des convertisseurs de puissance dans le cas particulier du photovoltaïque, la source renouvelable produit une puissance (tension et courant) continue qui est traitée par des dispositifs d'électronique de puissance (hacheurs et onduleurs), de manière à produire des tensions et courants alternatifs stables et synchronisés avec la base du micro-réseau. Il en est de même de l'éolien où les générateurs sont dans la plupart des cas des génératrices synchrones ou asynchrones qui nécessitent des chaînes de conversion AC-DC/AC pour délivrer l'énergie aux normes requises.

Un exemple d'architecture de micro réseau est donné à la figure I.2. Chaque micro source possède un contrôleur (CMS) qui assure le fonctionnement optimal de l'équipement, effectue des mesures automatisées et interprète les consignes émises par le contrôleur général du micro réseau (CGM). Les dispositifs de stockage possèdent des structures similaires et sont gérés par

des contrôleurs de système de stockage (CSS). Au niveau des charges, des systèmes automatisés de mesure (SAM) permettent de mesurer la consommation à tout instant tout en renseignant le CGM sur l'état du réseau. Enfin, le CGM centralise les données de micro-réseau et gère les échanges d'informations et d'énergie avec un système plus global (Réseau d'énergie National, internet).

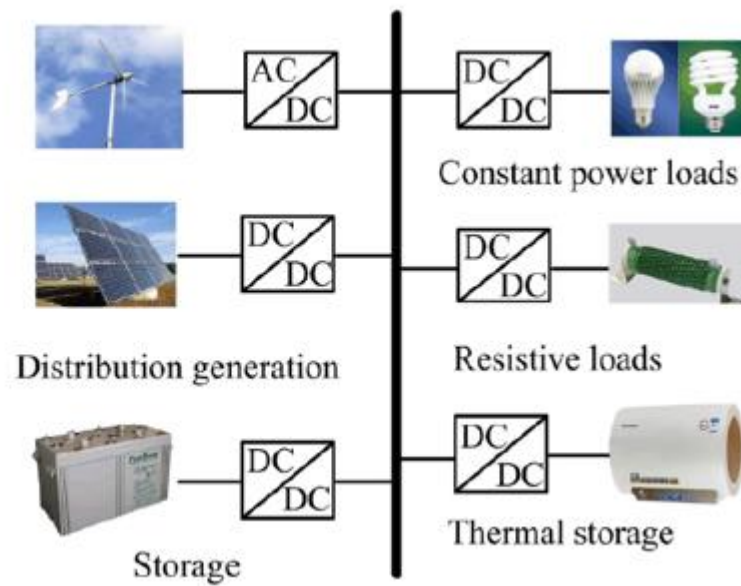


**figure.I.2 :** Architecture type d'un micro-réseau AC.[5]

#### I.2.4.2 Les micro-réseaux de type DC (Courant Continu) ;

Compte tenu de la multitude d'onduleurs requis pour adapter les nouvelles technologies de production et de stockage au bus principal des micro-réseaux AC, l'objectif principal du micro-réseau DC est de réduire les coûts et les pertes en supprimant les interfaces AC (onduleurs et filtrages AC). Par ailleurs, ces structures éliminent la nécessité de synchroniser les différentes sources et permettent une meilleure intégration des sources renouvelables. L'énergie est transférée à travers le micro-réseau à l'aide d'un bus courant continu. Les charges traditionnelles AC (les machines électriques par exemples) nécessitent des onduleurs pour adapter leurs alimentations. Il en est de même pour la connexion au réseau national qui doit se faire au travers d'un onduleur assisté peut être utilisé à cet effet.

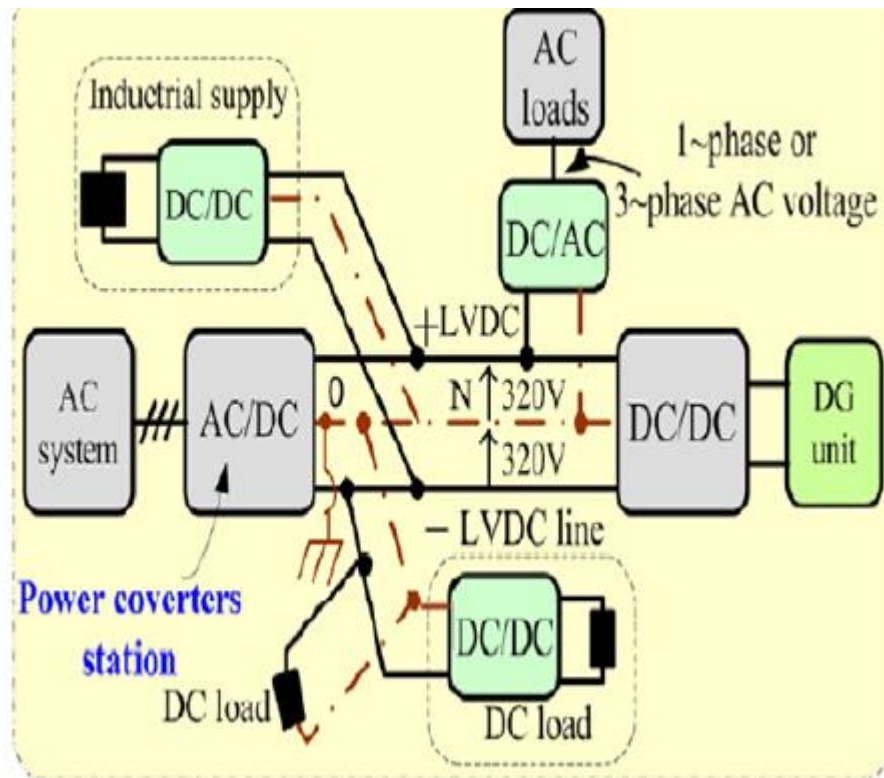
On entend par architecture d'un micro-réseau, ou topology en anglais, la manière dont vont être disposées et reliées entre elles les différentes sources et charges distribuées au sein du micro-réseau. Il existe deux catégories d'architectures qui sont les singlesbus et les multi terminaux.



**Figure.I.3 :** Configuration d'un micro-réseau DC.[6]

#### I.2.4.2 .1Single Bus ;

Il s'agit de l'architecture la plus simple. Elle est composée d'un long câble unique reliant deux terminaux auxquels vont être connectés toutes les sources et charges du micro-réseau. La figure I.4. Est une bonne illustration d'un micro-réseau avec une architecture single bus. Lorsque l'on parle d'architecture de micro-réseau, on précise aussi le type de câble en fonction du nombre de conducteurs qu'il y a dans celui-ci. En DC il y a deux types de câbles différents qui sont monopolaires et bipolaires. Un câble monopolaire est composé d'un seul conducteur, lui-même entouré d'isolant et de gaine de protection, tandis que les câbles bipolaires sont composés de deux conducteurs eux aussi entourés d'isolant et de gaine de protection.



**Figure.I.4** : Exemple de circuit avec une architecture single bus bipolaire [7]

Le câble bipolaire est donc composé de deux conducteurs, avec chacun une polarité différente et une référence entre les deux. L'utilité principale du bipolaire, par rapport au monopolaire, est de pouvoir choisir sa tension entre  $2V$ ,  $V$  et  $-V$  afin de convenir et de s'adapter au mieux aux différents types de convertisseurs qui y seront raccordés. Un autre avantage est qu'en cas de besoin, le câble peut aussi être utilisé comme monopolaire. [7]

Les câbles monopolaires, quant à eux, sont généralement utilisés en HVDC (High voltage DC, haute tension DC) où le seul but est de transporter l'énergie d'un point A à un point B, comme le projet ALEGrO reliant la Belgique et l'Allemagne, projet débuté en 2016.[8]

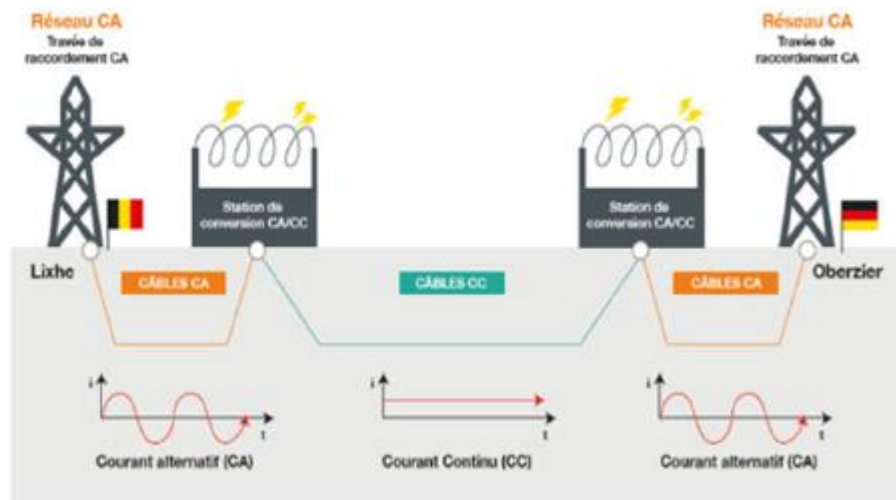
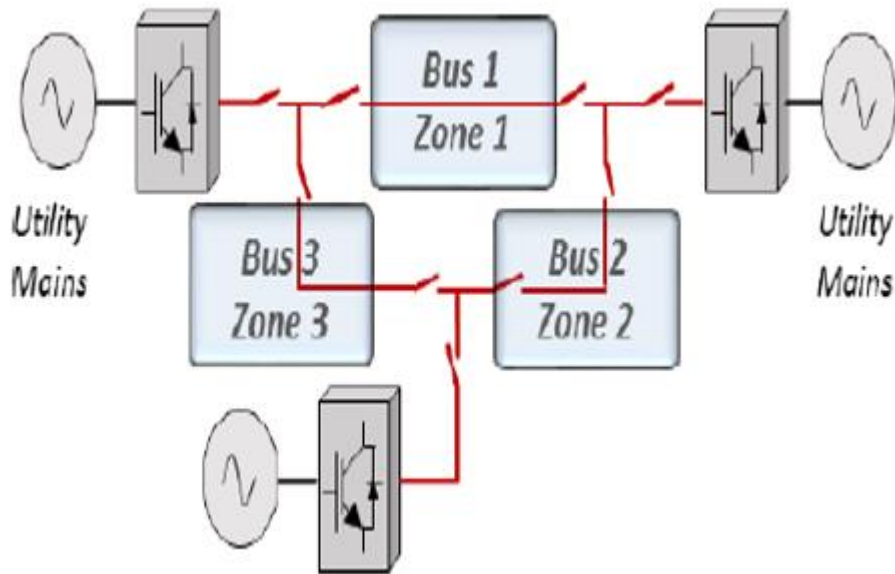


Figure. I.5 : Exemple de circuit avec architecture single busmono polaire. [8]

#### I.2.4.2 .2 ; Multi terminaux ;

L'architecture en multi terminaux fait opposition au single bus puisqu'ici, au lieu de concentrer tout sur un câble unique, il s'agira de plusieurs single bus connectés ensemble et créant un maillage qui peut prendre toutes sortes de formes.

Un exemple de micro-réseau DC multi terminal est illustré à la figure. I.6. Ce style de topologie est souvent utilisé pour le HVDC comme pour la production éolienne Off-shore.



**Figure. I.6:** Exemple de micro-réseau basé sur une topologie multi-terminal [7]

#### I.2.4.3 Les micro-réseaux hybrides (AC/DC) ;

Dans les dernières décennies, des électrifications rurales ont été réalisées avec des énergies renouvelables au moyen de générateurs individuels, autrement dit ; un utilisateur, une installation.

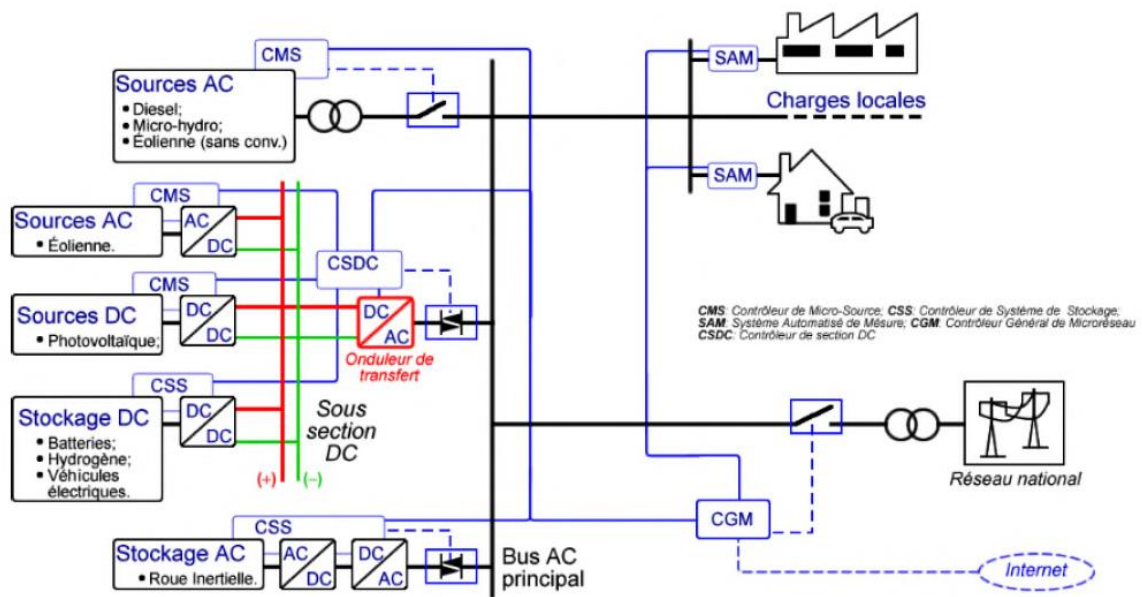
L'avance technologique permet maintenant l'évolution vers les installations collectives à travers l'utilisation de micro-réseaux –hybrides avec génération et accumulation distribuée qui présentent des avantages importants par rapport à leurs prédécesseurs du fait d'inclure la gestion intelligente dans la génération et le stockage et la gestion de la demande pour chacun des utilisateurs.

L'expérience dans ce type de réseau a mis en évidence que des aspects qui ne sont pas purement technologiques tels que la connaissance sociale, financière et organisationnelle des lieux concernés de destination ont des facteurs clés pour la réussite tant dans l'utilisation que dans le coût de l'énergie fournie.

L'architecture hybride permet de tirer le meilleur des architectures AC et DC. En général, des sous-sections entièrement DC sont aménagées dans un micro-réseau AC pour agréger au mieux les ressources (production et stockage) de type DC ainsi, on évite l'emploi d'onduleurs centraux de grandes puissances dont le dysfonctionnement peut paralyser le réseau tout entier. À la place, on dispose d'une multitude d'onduleurs de moindre capacité servant de concentrateurs ces derniers peuvent être gérés par des contrôleurs de section DC (CSDC). La section principale

étant de type AC, elle permet une connexion simple aux sources traditionnelles, aux réseaux adjacents et aux charges industrielles locales.

On peut aussi imaginer un micro-réseau DC possédant des sous sections AC, cependant cette solution s'avère moins économique. Il est aussi à noter que toute section DC possédant un CSDC au moins une source et un système de stockage est assimilable à un micro-réseau DC fonctionnant en cogénération avec le micro-réseau AC principal. Ainsi, une architecture hybride peut être conçue comme un agrégat constitué de micro-réseaux de différentes natures.[5]



**Figure. I.7 :** Architecture hybride (AC possédant une sous-section DC)[5]

### I.3 Les réseaux électriques du futur

#### Vers des réseaux électriques décentralisés intelligents surs et fiable « Smart Grid » ;

L'énergie électrique n'étant que difficilement stockable à grande échelle et à bas coût, les producteurs, transporteurs et distributeurs d'énergie sont contraints d'assurer en permanence un équilibre entre consommation et production d'électricité afin de maintenir la stabilité du réseau.

Aujourd'hui, cet équilibre est régulièrement menacé par une demande d'énergie électrique croissante, des aléas climatiques de plus en plus nombreux, et les sources d'énergie Renouvelables, propres mais intermittentes à l'inverse de sources d'énergie fossiles traditionnelles.

le développement récent des technologies de communication, de contrôle, de stockage et de production distribuée permet d'envisager une évolution du réseau actuel, dominé par un modèle de production centralisé devenu obsolète, afin de pouvoir faire face à ces problématiques et continuer à assurer une alimentation optimale, fiable et de qualité une évolution vers des réseaux intelligents dits (smart grids) qui est un réseau de distribution de L'électricité qui utilise au mieux les possibilités offertes par les technologies de la communication et de l'information, il s'agit d'un ensemble de technologies le rendant capable d'intégrer intelligemment les comportements et les actions des utilisateurs (à la fois producteurs et consommateurs) qui y sont connectés pour fournir efficacement une énergie électrique durable, économique et sûre. L'adoption de ce nouveau paradigme dont l'impact pourra être comparée à l'apparition d'internet, sera un atout pour satisfaire les nouveaux besoins en électricité et réduire significativement les investissements nécessaires au déploiement de nouvelles infrastructures sur le long terme. Les smart grids sont en effet de véritables outils complets de gestion de la production, du stockage et de la consommation électrique. [9]

### **I.3.1 Quels objectifs un réseau de distribution intelligent permet-il d'atteindre ;**

Le mode de fonctionnement probable des réseaux de distribution dans les années qui viennent va être impacté par leur devenir qui dépend des objectifs que l'on va leur assigner.

Les quatre éléments suivants peuvent caractériser les qualités que l'on attende de ces réseaux ;

**1-Accessibles** ; les réseaux devront accueillir tous les producteurs désireux de s'y raccorder.

**2-économiques** ; l'accent sera mis sur une exploitation tirant le meilleur parti de l'infrastructure permettant des coûts optimisés au bénéfice de tous les utilisateurs.

**3-flexibles** ; la redondance des chemins sera augmentée par rapport à la construction de nouveaux ouvrages afin d'optimiser l'efficacité énergétique des chemins existants ce qui permet d'optimiser la réaction du réseau aux diverses perturbations qui l'affecte dans les conditions de sécurité, d'économie et de respect de l'environnement.

**4-fiables** ; afin d'assurer et augmenter la sécurité et la qualité de fourniture. [10]

#### **I.3.1.2 objectifs techniques ;**

Sur le plan technique les objectifs majeurs du réseau intelligents sont de permettre de ;



1-faciliter l'insertion massive des énergies renouvelables, permettre le stockage de l'énergie dans les meilleures conditions économiques, de sécurité et de qualité.

2-renforcer l'efficacité énergétique globale par une augmentation notable du rendement énergétique du système électrique dans son ensemble.

3-intégrer le consommateur devenu actif dans la recherche d'équilibre entre l'offre et la demande au meilleur coût ; le consommateur final ne sera plus considéré comme passif mais plutôt proactif en étant aussi producteur et gestionnaire de sa consommation tout en participant à la résolution de certaines contraintes du réseau, la réduction des pointes de consommation ou offrir tout autre service nécessaire au système en fonction des conditions du marché en place, de la réglementation en vigueur ou des technologies disponibles.

4-rendre la gestion du système efficace face à la complexité croissante des informations reçues.

5-permettre une gestion aisée du système électrique et faire face à la complexité croissante du système électrique.

6-permettre une interopérabilité entre les différents acteurs et parties prenantes ; entre le réseau de transport et le réseau de distribution.[9]

### **Conclusion :**

Dans le premier chapitre, nous avons traité la définition de micro-réseau et ses différents types, Ainsi ses avantages et inconvénients. En fin nous avons parlé sur le micro-réseau Intelligent et ses multiples objectifs.

## Chapitre II : modélisation des micro- réseaux

### INTRODUCTION

Le problème majeur associé aux énergies décentralisées de sources renouvelables est qu'elles ne participent en général pas aux services systèmes (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome ou black start, . . .). Elles se comportent donc comme des générateurs passifs du point de vue de la gestion du système électrique.

Les réglages de la tension et de la fréquence sont, dès lors, reportés sur les alternateurs classiques comme des centrales thermiques ou des grandes centrales hydrauliques pour les cas connectés, et des groupes électrogènes pour des cas îlotés. Le taux de pénétration de cette production, c'est-à-dire la puissance qu'elle fournit par rapport à la puissance consommée à chaque instant, doit alors être limitée afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables.

Pour des énergies renouvelables intermittentes, comme le solaire ou l'éolien par exemple, cette barrière est d'autant plus vraie que leur production peut passer de 100% à 0% en quelques secondes. Dans le cas connecté, les grosses centrales ont généralement la réserve suffisante pour pallier à ces intermittences, mais dans un microgrid îloté basé sur des générateurs diesel, cela signifie d'avoir suffisamment de groupes électrogènes allumés pour assurer la réserve et la stabilité, le microgrid perd alors tout son sens puisqu'il ne réduit ni la consommation de fuel, ni les émissions CO<sub>2</sub>.

Ce phénomène est mis en lumière par [Pourmousavi en 2012] qui évalue l'impact de la pénétration des renouvelables sur la fréquence et la tension dans un microgrid composé d'un générateur basé sur le statisme et de production distribuée. Le résultat montre clairement qu'avec les technologies classiques d'onduleur, plus la pénétration de renouvelable est importante, plus les excursions de la fréquence et la tension, par rapport à leurs valeurs nominales, sont importantes. Les récents travaux de [Nahata en, 2017] montrent que l'utilisation d'onduleurs classiques impose un contrôle basé sur réduction de la puissance renouvelable pour éviter les instabilités mais également les problèmes de surtensions.

Pour imaginer la participation à la stabilité du réseau, plusieurs solutions ont été proposées avec des résultats divers, on peut citer principalement le "support réseau" et le "générateur virtuel", mais d'autres solutions de contrôle des onduleurs dans le cas précis des microgrids. Dans le présent chapitre on s'intéressera à la modélisation d'un micro-réseau alimenté en courant

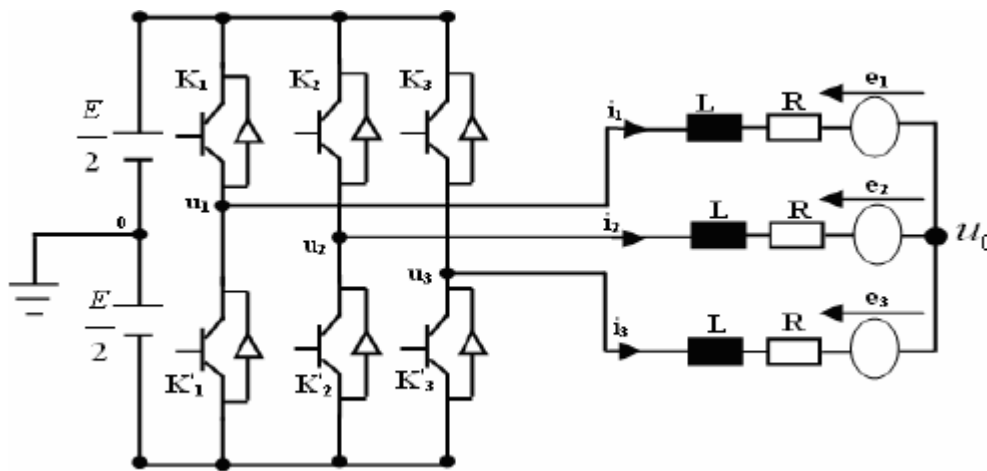
alternatif connecté à un réseau, pour effectuer ce travail on va modéliser un modèle de système onduleur comprenant un ensemble complet de sous-systèmes requis pour interfacer une source renouvelable à un réseau [11].

**II.1 Onduleur de source de tension (VSI) ;**

Le principe de fonctionnement de l'onduleur de tension triphasé alimentant un moteur alternatif est montré dans la figure 1. Où le moteur est représenté par un schéma approximé équivalent, comportant une résistance, une inductance et une force contre-électromotrice montées en série pour chaque phase. Le neutre du moteur est isolé au point milieu de la source d'alimentation de l'onduleur ;

Où ;

$$(R) = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix}, \quad (L) = \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$



**Figure II.1 : Onduleur triphasé alimentant un moteur avec neutre isolé.**

L'équation de charge est donnée comme suit:

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + e + u_0 I \tag{II. 1}$$

Où  $u$  et  $i$  sont, respectivement les vecteurs de tensions et de courants de sortie de l'onduleur  $U_0$  est la tension entre le neutre de la charge et le point milieu de la source d'alimentation de l'onduleur et  $I$  est le vecteur unitaire qui sont définis comme suit :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Grâce à l'équilibre de la charge, la somme des courants  $i_1, i_2, i_3$  est égale à zéro, (1) donne :

$$u_0 = \frac{(u_1 + u_2 + u_3)}{3} \quad (\text{II. 2})$$

La tension de sortie  $u$  peut prendre les valeurs  $\pm E / 2$  selon l'état de commutation. Si un courant de référence  $i^*$  circule dans la charge donc, l'équation de charge devient:

$$u^* = L \cdot \frac{di^*}{dt} + R \cdot i^* + e \quad (\text{II. 3})$$

Dans ce cas, la tension  $u^*$ , et le courant  $i^*$  sont des fonctions sinusoïdales, donc la différence entre le courant de charge et le courant de référence peut être définie comme suit:

$$\delta = i - i^* \quad (4)$$

De l'équation (1) et (3), nous avons :

$$L \frac{d\delta}{dt} + R\delta = u - u^* - u_0 I \quad (\text{II. 4})$$

L'équation 4 montre qu'à cause de la présence de  $U_0$ , l'erreur de courant durant une période de commutation n'est pas triangulaire, car sa pente pour chaque phase dépend de l'état de toutes les autres phases par  $U_0$ , on appelle ce phénomène "phénomène d'interférence entre les phases".

Pour éviter ce phénomène d'interférence entre les phases dû au neutre isolé, nous devons découpler l'erreur de courant réelle comme suit ;

$$\delta' = \delta - \delta'' \quad (\text{II. 5})$$

$\delta'$ : Erreur de courant découplée

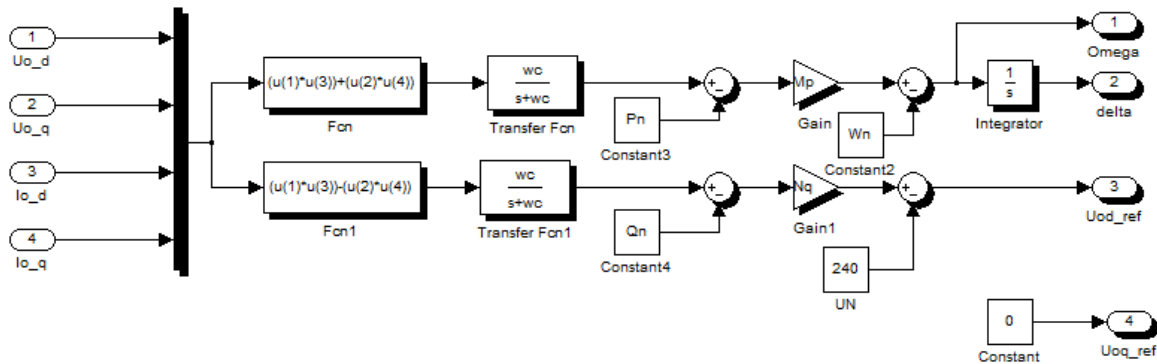
$\delta''$ : Terme de découplage

On l'appelle erreur de courant découplée, car il est possible de définir une équation dynamique pour cette erreur ne dépendant plus de  $U_0$ , et dite découplée car l'erreur pour une phase donnée ne dépend que de la tension correspondante à cette phase.

Le contrôleur de statisme d'un VSI se compose de trois parties ; contrôleur de partage de puissance, tension et courant. Le modèle dynamique de chaque partie est dérivé comme suit respectivement [12].

**II.1.1 modilisation du contrôleur de puissance ;**

L'idée de base du pouvoir fonction de partage est d'équilibrer toute augmentation de la fréquence et l'amplitude de tension du système selon les caractéristiques de statisme .comme le montre la figure 2[13].



**Figure II.2 :** Schéma fonctionnel du contrôleur de puissance.

La puissance active et réactive instantanées sont calculés à partir de la tension et du courant de sortie mesurés à travers la théorie des deux axes. Pour obtenir une qualité de puissance correspondant à la composante fondamentale sont obtenu au moyen d'un filtre –bas ;

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{wc}{s + wc} (u_{0d}i_{0d} + i_{0q}u_{0q}) \\
 Q &= \frac{wc}{s + wc} (u_{0d}i_{0q} - u_{0q}i_{0d})
 \end{aligned}
 \tag{II.6}$$

Le facteur de transformée de la place :Uod ,Uoq ,Iod, Ioq sont les sorties placer les tensions et les courants dans le référentiel dq ainsi le modèle dynamique de contrôle de puissance a petit signal est donné par ;

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{p} &= -wc\Delta p + wc(I_{0d}\Delta u_{0d} + I_{0q}\Delta u_{0q} + u_{0d}\Delta i_{0d} + u_{0q}\Delta i_{0q}) \\
 \Delta \dot{Q} &= -wc\Delta Q + wc(I_{0q}\Delta u_{0d} - I_{0d}\Delta u_{0q} - u_{0q}\Delta i_{0d} + u_{0d}\Delta i_{0q})
 \end{aligned}
 \tag{II.7}$$

Dans le système d'onduleur en parallèle, la tension fondamentale et la fréquence sont définies par le gain de statisme, qui peut être défini comme ;

$$\begin{aligned} w &= wn - mp(P - Pn) \\ u_{0d}^* &= U_n - n_q(Q - Qn) \\ u_{0q}^* &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II. 8})$$

Ou  $m_p$ ,  $n_q$  sont les gains de statisme statique .le petit signal ,et les modèles de la fréquence et de la tension en deux axes sont ;

$$\begin{aligned} \Delta w &= -m_p \Delta P \\ \Delta u_{0d}^* &= -n_q \Delta Q \\ \Delta u_{0q}^* &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II. 9})$$

Afin de convertir toutes les variables de chaque onduleur référence a un repère commun, la différence d'angle entre  $d_q$  de chaque onduleur et  $D_Q$  commune est défini comme :

$$\delta = \int (w - w_{com}) dt \quad (\text{II.10})$$

Ou  $w_{com}$  est la pulsation du repère commun pris par le premier onduleur généralement. Le modèle petit signal est ;

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta w - \Delta w_{com} = -m_p \Delta P - \Delta w_{com} \quad (\text{II.11})$$

### II.1.2 modèle de contrôleur de tension ;

La boucle de régulation de tension utilise un régulateur standard proportionnel et intégral (PI) qui compare la tension de sortie échantillonnée avec la référence, la valeur donnée par le contrôleur de puissance, et obtient une anticipation gain pour compenser les perturbations du

courant de sortie et calcule le vecteur de courant de découplage de référence comme illustré à la fig.3 [14].

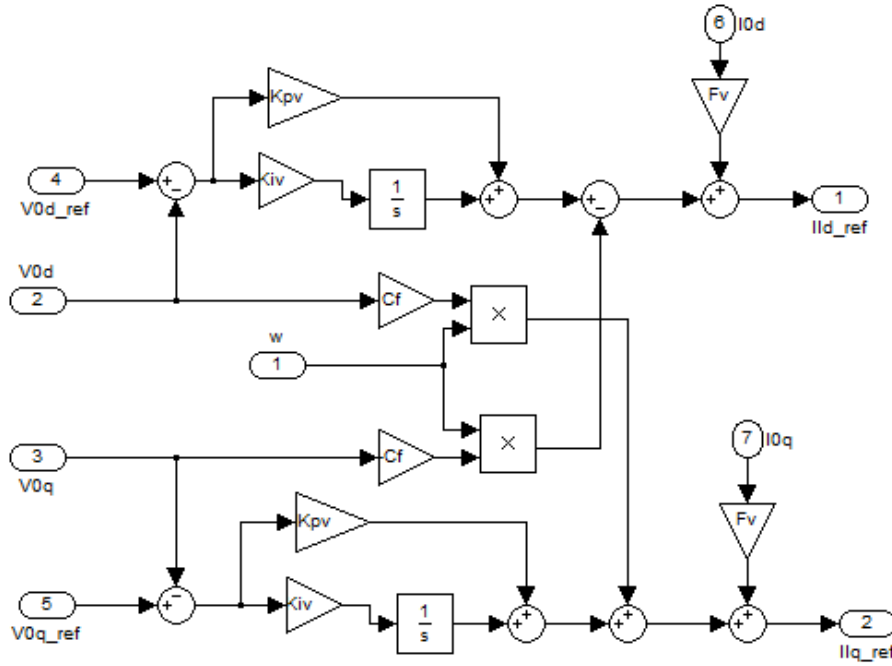


Figure II.3 : schéma fonctionnel du contrôleur de tension.

Les équations d'état correspondantes sont ;

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_d}{dt} &= u_{0d}^* - u_{0d} \\ \frac{d\phi_q}{dt} &= u_{0q}^* - u_{0q} \end{aligned} \tag{II.12}$$

$$\begin{aligned} i_{Id}^* &= k_{iu}\phi_d + k_{pu}(u_{0d}^* - u_{0d}) - w_n C_f u_{0q} + G i_{0d} \\ i_{Iq}^* &= k_{iu}\phi_q + k_{pu}(u_{0q}^* - u_{0q}) - w_n C_f u_{0d} + G i_{0q} \end{aligned} \tag{II.13}$$

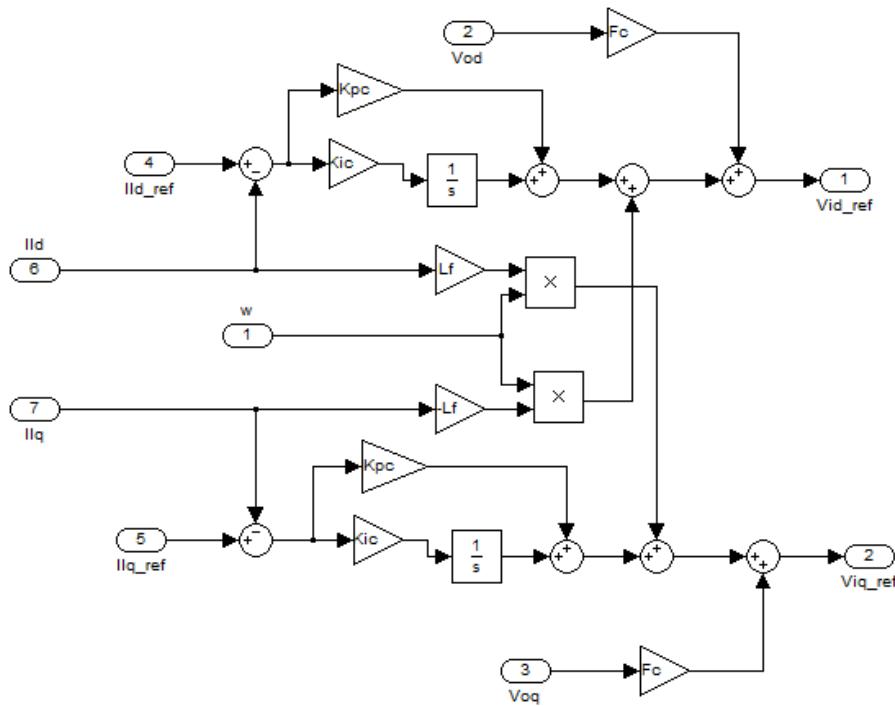
Ou  $k_{pu}$ ,  $k_{iu}$  sont les gains proportionnels et intégraux de la tension  $C_f$  est la capacité par phase du filtre LC ;  $G$  est le gain de commande prédictif .Le modèle de contrôle de la tension peut être donné par ;

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\phi}_d &= \Delta u_{0d}^* - \Delta u_{0d} \\ \Delta\dot{\phi}_q &= \Delta u_{0q}^* - \Delta u_{0q} \end{aligned} \tag{II.14}$$

$$\begin{aligned} \Delta i_{1d}^* &= k_{iu} \Delta \phi_d + k_{pu} (\Delta u_{0d}^* - \Delta u_{0d}) - w_n C_f \Delta u_{0q} + G \Delta i_{0d} \\ \Delta i_{1q}^* &= k_{iu} \Delta \phi_q + k_{pu} (\Delta u_{0q}^* - \Delta u_{0q}) - w_n C_f \Delta u_{0d} + G \Delta i_{0q} \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

**II.1.3 modèle de contrôleur de courant ;**

Le contrôleur de courant produit une erreur de courant minimale en utilisant un contrôleur PI pour comparer le fil échantillonné actuel de courant et la valeur de référence donnée par le contrôleur de tension comme illustré la fig.4 [14].



**Figure II.4 :** schéma fonctionnel du régulateur de courant.

Le modèle de contrôle de tension à petit signal est ;

$$\begin{aligned} \Delta \gamma_d &= \Delta i_{1d}^* - \Delta i_{1d} \\ \Delta \gamma_q &= \Delta i_{1q}^* - \Delta i_{1q} \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$



$$\begin{aligned}\Delta u_{id}^* &= k_{ic}\Delta\gamma_d + k_{pc}(\Delta i_{id}^* - \Delta i_{id}) - w_n L_f \Delta i_{iq} \\ \Delta u_{iq}^* &= k_{ic}\Delta\gamma_q + k_{pc}(\Delta i_{iq}^* - \Delta i_{iq}) - w_n L_f \Delta i_{id}\end{aligned}\quad (\text{II.17})$$

Ou  $K_{pc}$ ,  $K_{ic}$  sont les gains proportionnels et intégraux du courant, respectivement ;  $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$  sont les courants de filtrage en référence dq et  $L_f$  est l'inductance par phase.

#### II.1.4.modèle de filtre LC et d'inductance de couplage ;

L'onduleur connecté au réseau par un filtre LC et inductance couplée peut supprimer l'onde harmonique près de la fréquence de commutation. Le modèle petit signal linéarisé est [15] ;

$$\begin{aligned}\Delta i_{id}^* &= -\frac{Rf}{L_f}\Delta i_{ld} + w_0\Delta i_{iq} - \frac{1}{L_f}\Delta u_{0d} + \frac{1}{L_f}\Delta u_{id} + I_{lq}\Delta w \\ \Delta i_{iq}^* &= -\frac{Rf}{L_f}\Delta i_{lq} - w_0\Delta i_{id} - \frac{1}{L_f}\Delta u_{0q} + \frac{1}{L_f}\Delta u_{iq} - I_{ld}\Delta w\end{aligned}\quad (\text{II.18})$$

$$\begin{aligned}\Delta u_{0d}^* &= \frac{1}{Cf}\Delta i_{ld} + w_0\Delta u_{0q} - \frac{1}{Cf}\Delta i_{0d} + U_{0q}\Delta w \\ \Delta u_{0q}^* &= \frac{1}{Cf}\Delta i_{lq} - w_0\Delta u_{0d} - \frac{1}{Cf}\Delta i_{0q} - U_{0d}\Delta w\end{aligned}\quad (\text{II.19})$$

$$\begin{aligned}\Delta i_{0d}^* &= \frac{1}{LC}\Delta u_{0d} + w_0\Delta i_{0q} - \frac{Rc}{LC}\Delta i_{0d} - \frac{1}{LC}\Delta u_{bd} + I_{0q}\Delta w \\ \Delta i_{0q}^* &= \frac{1}{LC}\Delta u_{0q} - w_0\Delta i_{0d} - \frac{Rc}{LC}\Delta i_{0q} - \frac{1}{LC}\Delta u_{bq} - I_{0d}\Delta w\end{aligned}\quad (\text{II.20})$$

Ou  $u_{bd}$ ,  $u_{bq}$  sont les tensions d'axe dq ;  $u_{id}$ ,  $u_{iq}$ , sont les tensions de l'onduleur dans ;  $w_0$   $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$ ,  $u_{0d}$ ,  $u_{0q}$ ,  $i_{0d}$ ,  $i_{0q}$  est la valeur en régime permanent au point de fonctionnement initial.

#### II.1.2 Système de boucle à verrouillage de phase PLL ;

La PLL est un système asservi, qui assure non seulement une fréquence de modulation constante, mais minimise également le déplacement de phase  $\Delta\phi$  entre le signal de référence externe (signal de synchronisation) et le signal de commande du système avec une précision limitée par le gain de la boucle. Le déplacement de phase  $\Delta\phi$  est détecté entre le centre de l'impulsion de commande et l'horloge externe, ce qui correspond au passage de l'erreur de

courant par zéro afin de garantir une réduction optimale des ondulations des courants de charge [15].

Le système PLL indiqué sur la figure II.5 ;

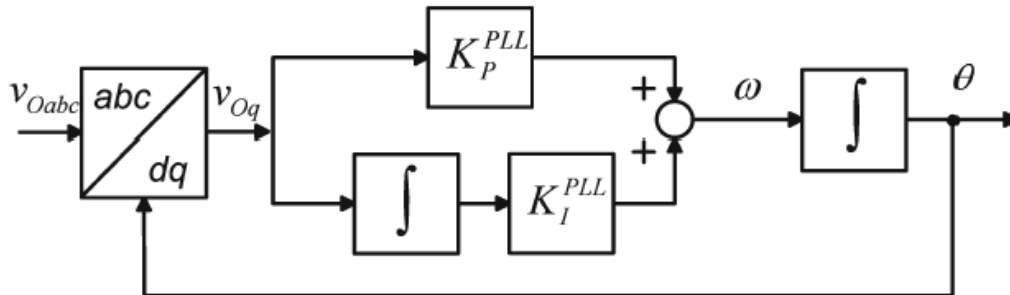


Figure II.5: Modèle pour la PLL.

$$\omega = k_p^{pll} V_{0q} + k_I^{pll} \int V_{0q} dt$$

$$\theta = \int \omega dt$$

### Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre la modélisation d'un micro-réseau alimenté en courant alternatif, on peut constater que chaque onduleur est équipé d'un ensemble de boucles de contrôle permettant la stabilité globale du système du micro-réseau.

## Chapitre III : stabilité des micro- réseaux

### III.1 Définition et classification de la stabilité dans les micro- réseaux :

#### III 1.1 Définition :

Considérons un micro-réseau qui fonctionne en équilibre, avec des variables d'état prenant des valeurs stables appropriées satisfaisant aux contraintes opérationnelles, telles que les gammes acceptables de courants, des tensions et de la fréquence [16]. Un tel micro- réseau est stable si, après avoir subi une perturbation.

Les variables reviennent à des valeurs d'état stable (éventuellement nouvelles) qui satisfaisent les contraintes opérationnelles et sans les survenances d'un délestage involontaire, notez qu'un micro-réseau qui effectue un délestage volontaire, sous le paradigme de réponse à la demande avec des charges participant volontairement à la commande du micro-réseau [17], est considéré comme stable s'il satisfait la condition précitée, de plus, si les charges sont déconnectées pour isoler les éléments en défaut après une perturbation, et non dans le seul but de délester pour répondre aux problèmes de tension et de fréquence, et le micro-réseau répond aux conditions susdites (citées en haut), le système peut également être considéré stable.

Dans les systèmes électriques traditionnels en raison du nombre élevé de charges et la grande échelle du système un déclenchement volontaire des charges est acceptable pour préserver la continuité de son fonctionnement [18].

Aucune charge n'a priorité sur la stabilité du système dans son ensemble. En revanche, les micro-réseaux sont conçus pour servir un nombre relativement faible de charges, et donc l'opérateur peut prioriser la connectivité de certains départs (par exemple, un qui alimente un hôpital) sur le reste du système; si une telle ou plusieurs départs critiques sont déclenchés, le micro-réseau n'atteint plus son objectif principal, ainsi le déclenchement intentionnel de charge pour maintenir le fonctionnement du reste du système pendant ou après une perturbation rend le système instable.

Dans la définition ci-dessus, les perturbations correspondent à toute apports exogènes, et pouvant être associés à des changements de charge, pannes de composants ou ajustements du mode de fonctionnement et point de consigne.

Si les perturbations sont considérées comme « faibles », de sorte que un ensemble d'équations linéarisé peut représenter adéquatement le comportement du système, ceux-ci sont classés comme petites perturbations comme d'habitude, sinon, les perturbations sont qualifiées de grandes perturbations, qui incluent les courts-circuits, les transitions du mode de fonctionnement connecté au réseau au mode de fonctionnement îloté, et la perte d'unités de production. Il est important de noter que l'îlotage planifié se traduit par une tension beaucoup moins importante et des excursions de fréquence, puisque les consignes de DER sont calculées et ajusté en conséquence avant l'îlotage.

En fonction de la cause fondamentale, l'instabilité des petites perturbations peut être un phénomène à court terme ou à long terme, par exemple un mauvais partage du pouvoir entre plusieurs DERs peut produire oscillations de puissance non amorties augmentant rapidement à court terme. D'autre part, les micro-réseaux fortement chargés peuvent présenter des oscillations non amorties avec petits changements de charge à long terme.

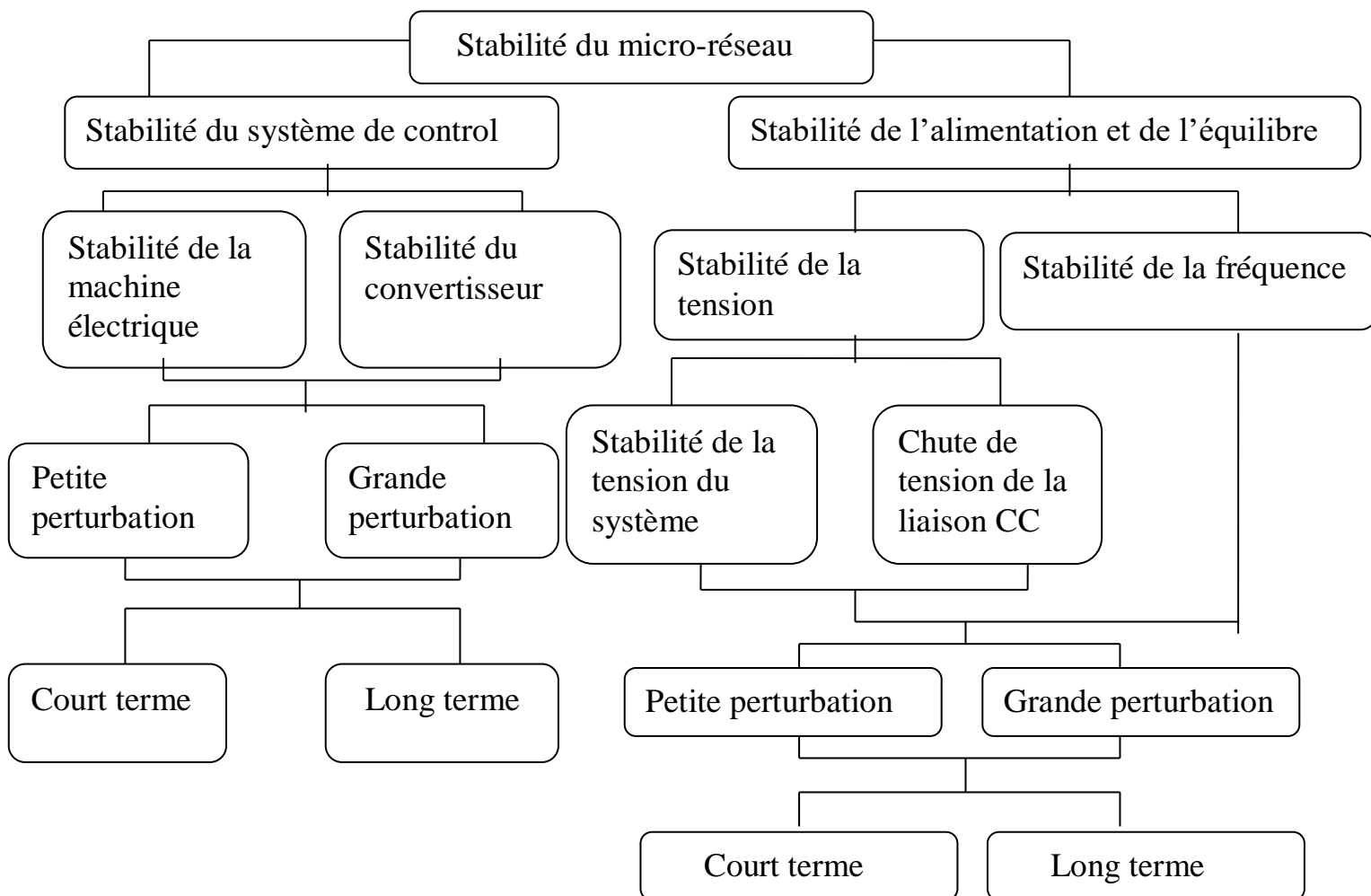


Figure III .1 : Classification de la stabilité dans les micro-réseaux.

### **III.1.2 classification :**

En raison des caractéristiques uniques des micro-réseaux, de nouveaux types de problèmes de stabilité peuvent être observés dans ces systèmes, par exemple dans les systèmes conventionnels, les transitoires et les problèmes de stabilité de tension se produisent généralement plus souvent que celles à stabilité de fréquence, alors que dans les micro-réseaux isolées et ilotées le maintien de la stabilité de la fréquence est plus difficile en raison de la faible inertie du système et d'une forte pénétration de RES, de plus certains problèmes de stabilité observés dans les grands systèmes interconnectés, tels que les oscillations interzones et effondrement de la tension n'ont pas été observés dans les micro-réseaux, ainsi il est nécessaire de revoir et de modifier la stabilité du système électrique [19].

Pour refléter correctement la stabilité pertinente dans les micro-réseaux.

La stabilité dans les micro-réseaux peut être classée selon la cause physique de l'instabilité, la taille relative de la perturbation, les composants physiques impliqués dans le processus, la durée pendant laquelle l'instabilité se produit, et la méthodologie pour analyser ou prédire l'instabilité.

La tension et la fréquence sont fortement couplées dans les micro-réseaux, et donc contrairement à certains phénomènes d'instabilité dans les systèmes conventionnels.

La figure III.1. illustre la classification de la stabilité dans les micro-réseaux, par conséquent, la stabilité des micro-réseaux doit être divisée en deux principales catégories ; phénomènes liés au contrôle des équipements des systèmes, et phénomènes relatifs aux actifs et réactifs partage et d'équilibre, on note que l'instabilité du micro-réseau dans l'une ou l'autre catégorie peut être un phénomène à court ou à long terme.

Les problèmes de stabilité à court terme ont une durée pouvant aller jusqu'à quelques secondes, tandis que d'autres problèmes au-delà de cette période concernant la stabilité à long terme.

### **III.2 Alimentation et stabilité de l'équilibre :**

La stabilité de l'alimentation et de l'équilibre se rapporte à la capacité du système pour maintenir l'équilibre des pouvoirs et partager efficacement la puissance de la demande parmi les DERs, de sorte que le système satisfait les exigences opérationnelles, ces types de problèmes de stabilité sont associés à la perte d'une unité de production, violation des DERs et le mauvais

partage de puissances entre plusieurs DERs [20]. De plus, certains types de charges, telles que des charges à puissances constante ou des moteurs à induction, peuvent déclencher certains types d'instabilités dans le système. Cette classe de stabilité peut être subdivisée en stabilité de fréquence et tension comme indiqué ci –après.

### **III.2 .1 Stabilité de la fréquence :**

La régulation des fréquences est un enjeu majeur préoccupation dans les micro-réseaux isolés et ilotes, en raison des caractéristiques expliquées au-dessus, y compris la faible inertie du système et une part élevée de SER intermittentes.

De plus, le faible nombre d'unités de production dans les micro-réseaux place le système dans le risque de perturbations importantes en cas de panne du générateur, par conséquent pour telles perturbations, la fréquence du système peuvent connaître de grandes excursions à un taux de changement élevé, risqué la stabilité de la fréquence du système [21], [22].

Dans ce contexte, les techniques classiques de contrôle de fréquence et les technologies peuvent ne pas être assez rapides pour surmonter la rapidité de changement de fréquence du système, même en présence de réserve de génération [23].

Le couplage fort entre la tension et la fréquence en micro- réseaux complique encore la régulation des fréquences, d'abord en raison de les ratios R/X élevés des départs de micro-réseaux ,ainsi que le découplage du flux de puissance active et des amplitudes de tension n'est plus valide [24].Deuxièmement en raison de la taille relativement petite échelle des micro-réseaux et le changements de tension aux bornes des DERs qui se réfléchissent presque instantanément du côté de la charge ,ce qui en tourner modifie la demande du système en fonction de la tension de charge ,par conséquent le couplage tension –fréquence doit être pris en compte dans l'analyse de stabilité et le contrôle de la fréquence dans les micro-réseaux.

L'instabilité de fréquence peut être déclenchée pour une variété de raisons dans les micro-réseaux, par exemple une augmentation importante de la charge accompagnée d'une réponse inadéquate du système qui peut entraîner une décroissance rapide de la fréquence due à la faible inertie du système ainsi qu'une mauvaise coordination des contrôleurs de fréquence multiples et de la puissance.

### **III.2 .2 stabilité de tension :**

Dans les systèmes électriques conventionnels la première cause de l'instabilité de la tension est la longue transmission des lignes, qui limitent le transfert de puissance entre la production

et les charges, cependant dans les micro-réseaux les départs sont relativement courts entraînant des chutes de tension faibles entre l'envoi et les extrémités de réception [25], [26]. ainsi que l'effondrement de la tension, c'est –à dire la décroissance lente est soutenue de la tension associé avec le processus de récupération de charge et la capacité d'alimentation réactive n'a pas été observé dans les micro-réseaux, néanmoins avec le réseaux de distribution actuels évoluant vers des micro-réseaux la chute de tension et limite de courant peuvent devenir un problème, en particulier pour grilles plus faibles et les plus anciennes[27].

Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante :

### **III.2.2.1 Manque local d'énergie réactive :**

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de la celle-ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs [28]. La limite de production de la puissance réactive des générateurs est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique.

### **III.2.2.2 Charge appelée trop importante :**

L'une des causes de l'instabilité de tension correspond à une charge élevée. Ceci est dû à l'augmentation croissante de la demande et à un large transfert d'énergie. Une instabilité de tension peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue.

### **III.2 .3 contrôle de la stabilité du système :**

Les problèmes de stabilité du système de contrôle peuvent survenir en raison de schémas de contrôle (par exemple, la résonance harmonique des DERs parallèles et le mauvais réglage d'un ou plusieurs équipements de contrôleurs), dans ce dernier cas les contrôleurs mal réglés est la principale source d'instabilité, et le système ne peut être stabilisée jusqu'à ce que le contrôleur soit ré-accordé ou que le morceau de l'équipement est déconnecté, ce type de stabilité concerne les machines électriques et les boucles de contrôle des onduleurs, filtre LCL, et PLL, cette catégorie de stabilité est sous –catégorisée en stabilité électrique de la machine et du convertisseur comme expliqué ci –après.

**III.2 .3.1 Stabilité de la machine électrique :**

Classiquement, ces types des études de stabilité portent sur la capacité de machines synchrones pour revenir au synchronisme avec le reste du système Suite à l'accélération angulaire de ces machines lors d'un défaut, cependant ce phénomène n'a pas observée dans les micro-réseaux, par exemple en raison de la nature de la résistance des micro-réseaux les machines synchrones peuvent ralentir lors des courts –circuits si un défaut survient en bout de départ.

**III.2 .3.2 Stabilité du convertisseur :**

Dans les micro-réseaux, les onduleurs sont sujets aux instabilités de petites et grandes perturbations, la tension intérieure et les boucles de contrôle de courant sont une préoccupation majeure pour la petite stabilité aux perturbations du système puisque leur réglage est un problème difficile dans la pratique, une panne de système après de fortes perturbations dues au déclenchement des DERs, en particulier SER basé sur l'onduleur en raison de la sous – fréquence et de la sous-tension.

Contrairement aux oscillations à base fréquence causées par des commandes de puissance, les interactions du courant interne et de la tension et les boucles de commande peuvent provoquer des oscillations à fréquence harmonique élevée, dans la gamme des centaines de HZ à plusieurs KHZ [29], [30], appelé instabilité harmonique qui un terme générique utilisé dans les pics multi résonance.

**III.2 .4 Grandes vs Petites perturbations :**

Dans le contexte des micro-réseaux, les grandes perturbations incluent les courts –circuits, les transitions imprévues du réseau connecté au mode de fonctionnement iloté et perte d'unités de production.

Les grandes perturbations peuvent entraîner une fréquence et une tension élevées, par conséquent des problèmes peuvent être dus à divers raisons, telles qu'un le mode de système qui est étant poussé vers la région instable par le défaut provoquer des oscillations non amorties dans le système observé lors de l'ilotage involontaire d'un micro –réseau connecté.

La stabilité de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que une variation faible de la charge, dans la littérature technique pour une gamme de phénomènes entraînant des oscillations à haute fréquence harmonique, y compris la résonance et les problèmes de multi – résonance.

La présence de plusieurs onduleurs à la proximité génère également des problèmes d'interaction de la production,...etc.



Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques des différents types de problèmes de stabilité dans les micro-réseaux.

| Catégorie                  | Stabilité du système de contrôle  |  | Stabilité de l'alimentation et de l'équilibre   |   |
|----------------------------|---|--|---|---|
| Sous-catégorie             | Stabilité de la machine électrique  | Stabilité de convertisseur   | Stabilité de tension  | Stabilité de fréquence  |
| Première cause             | Mauvais réglage du contrôleur.  | Mauvais réglage du contrôleur, bande passante PLL, échec de synchronisation PLL, instabilité harmonique. | Limites de puissance des DER, alimentation réactive insuffisante, mauvais partage de la puissance réactive, sensibilité de tension de charge. | Limites de puissance active des DER, alimentation active insuffisante, mauvais partage de la puissance active.        |
| Manifestation (les signes) | Oscillations non amorties, tension aperiodique et /ou augmentation de la fréquence. | Oscillations non amorties, basses tensions en régime permanent, oscillations à haute fréquence.          | Basses tensions en régime permanent, grandes oscillations de puissance, hautes ondulations de tension de circuit intermédiaire.               | Taux élevé de changement de fréquence, basse fréquence en régime permanent, grande puissances et sautes de fréquence. |

**Tableau III .1** : les caractéristiques des différents types de problèmes de stabilité dans les micro-réseaux.

### **III.2 .5 Contrôle et stabilité des micro-réseaux AC :**

Des techniques de contrôle robustes sont nécessaires pour une exploitation économique du micro- réseau AC, cette section distraite des techniques de contrôle suivantes et des problèmes de stabilité de micro-réseaux AC :

- Contrôle de la tension et de la fréquence.
- Coordination entre les DER et partage du pouvoir des aspects.
- Synchronisation du micro-réseau.
- Contrôle de flux d'énergie entre plusieurs micro-réseaux.
- Réduction des pertes.
- Atténuation des pannes d'électricité.

#### **III.2 .5.1 Schéma de contrôle hiérarchique :**

Pour remplir les aspects de contrôle trois niveaux de stratégies de contrôle à savoir (1) primaire, (2) secondaire, et (3) des contrôles tertiaires sont appliqués dans les micro-réseaux AC, et est connu sous le nom de contrôle hiérarchique.

##### **III.2 .5.1.1 Commande primaire :**

Les principales fonctions de la commande primaire sont :

- Maintenir la tension et la fréquence dans des limites acceptables.
- Partage de puissance active et réactive entre les DERs opérant en parallèle.
- Pour assurer des opérations plug and play le contrôle primaire doit être plus rapide que le contrôle secondaire.

##### **III.2 .5.1.2 Commande secondaire :**

Bien que la commande primaire maintienne une tension et une fréquence stables, il ya toujours une tension et une fréquence en régime permanent et des déviations dans les micro-réseaux AC. Le contrôle secondaire est un contrôleur qui régule la tension et la fréquence en régime permanent, il est généralement plus lent que le contrôle primaire [31], [32]. Comme les stratégies d'optimisation sont utilisées dans le contrôle secondaire, il nécessite une communication bidirectionnelle. Les schémas de contrôle secondaire peuvent être divisés en systèmes de contrôle centralisés et décentralisés. Généralement le contrôle centralisé est utilisé dans les petits micro-réseaux AC tout en étant les systèmes décentralisés sont utilisés dans les grands micro-réseaux.

**III.2 .5.1.3 Commande tertiaire :**

Les écarts de tension et de fréquence en régime permanent causés par la commande primaire sont régulés par la commande secondaire, tandis que le flux d'énergie entre le réseau électrique et le micro-réseau sont gérés par le contrôle tertiaire qui facilite tout fonctionnement économique du micro-réseau principal, la régulation tertiaire gère le flux d'énergie entre le réseau électrique et le micro-réseau en réglage de la référence de puissance des DER [33].

**III.2 .6 schéma de contrôles basés sur la communication :**

Les ressources énergétiques renouvelables et les systèmes de stockage d'énergie au sein du micro-réseau doit être correctement coordonné pour supporter des diverses charges, les DERs fonctionnant en parallèle et les systèmes de stockage de batteries sont connectés via les liens de communication [34], pour coordonner leur fonctionnement.

Les schémas de contrôle basés sur la régulation peuvent maintenir une régulation de tension appropriée et le partage du pouvoir, les sous-sections suivantes seront les stratégies de contrôle basées sur la communication de micro-réseau AC.

**III.2 .6.1 Schéma de contrôle centralisé :**

Dans les schémas de contrôle centralisé, un contrôleur central est employés dans les micro-réseaux pour déterminer les actions de contrôle de DERs, une analyse approfondie du micro-réseau central contrôleur (MGCC) est donné dans l'initiative du action du communication en mode (connecté au réseau en mode iloté ou iloté au mode connecté au réseau) en observant le pcc (point of common coupling) de la tension et la fréquence ,de plus il surveille la puissance généré par les DERs (Distributed energy resources) individuels et optimise la puissance des DERs.

La stratégie MGCC a besoin des mêmes signaux de synchronisation et les modules de partage actuels, les DERs interfacé PEC (Power electronic converter) a un PLL(Phase-locked loop) qui maintient une phase cohérente entre le signal de synchronisation et la fréquence et la tension de sortie.

**III.2 .6.2 Schéma de contrôle distribué :**

Cette méthode n'a pas de contrôleur central et chaque convertisseur à une unité de commande individuelle [35] - [36]. Le point commun de couplage PCC ou bus commun est utilisé comme bus de partage de loyer pour générer et partager le courant de référence.

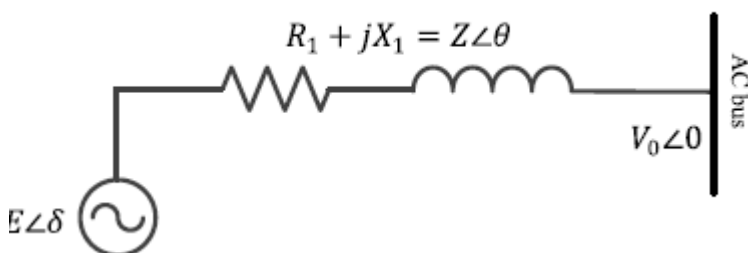
Une boucle de courant supplémentaire est nécessaire pour générer le courant de référence pour le partage de courant, dans une distribution le contrôle du micro-réseau AC est proposé pour rétablir la tension et le partage de puissance réactive.

**Tableau III .2 :** comparaison des méthodes de contrôle basées sur la communication des micro-réseaux alimenté par un courant alternatif.

| Stratégie            | Perspectives   | Problèmes   |
|----------------------|--|---|
| Contrôle centralisé. | Meilleur partage de puissance dans les conditions transitoires et stables .Excellente régulation de la tension et de la fréquence. | Bande passante élevée avec un cout de mise en œuvre plus élevé. Communication redondante requise .ne peut pas tolérer l'échec d'un seul point de communication. |
| Contrôle distribué.  | Tension constante et partage de puissance peut tolérer un point de défaillance unique. Communication à bande passante moyenne.     | Réduire la modularité du système.   |

**III.2 .7 Techniques de contrôles basés sur le drop :**

Cette section passe en revue de manière critique les aspects de contrôle, les problèmes et les perspectives de contrôle du statisme qui est indépendant de la communication inter-unités est le plus couramment utilisé entre les convertisseurs fonctionnant en parallèle, il peut être mis en œuvre facilement et il permet de brancher ainsi qu'une opération de lecture. un DER avec phaseur de tension(  $E \angle \delta$ ) illustré dans la figure III .4 est connecté au bus AC avec une tension ( $V_0 \angle 0$ ).



**la figure III .2 :** DER connecté au micro-réseau.

L'impédance de la ligne d'alimentation est  $R1 + jX1 = Z \angle \theta$ .

La puissance de sortie du DER injecté au bus AC est calculée comme :

$$S = P + jQ = V_0 * I^* = \frac{v * E(\theta - \delta)}{Z} - \frac{V_0^2}{Z} \quad (\text{III.1})$$

Ou S et P et Q sont les puissances complexes, réelles et réactives respectivement, si la ligne est inductive, c'est-à-dire  $\theta = 90^\circ$ .

La puissance réelle et réactive peut être calculée comme suit [37] :

$$P = \frac{V_0 * E}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{V_0^2}{Z} \cos(\theta) \quad (\text{III.2})$$

$$Q = \frac{V_0 * E}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{V_0^2}{Z} \sin(\theta)$$

### III.2 .7.1 Contrôle d'attaque conventionnel :

Le contrôle du statisme permet aux DERs (générateurs statiques) de se comporter similaire au statisme du générateur synchrone utilisé dans un système d'alimentation conventionnel.

Le statisme le plus couramment utilisé est le statisme actif à fréquence industrielle (P-F) et le statisme réactif puissance – tension (Q-V).

Le circuit simplifié d'un VSC (Voltage source converter) basé sur DER avec P-F et Q-V.

Le VSC consiste en un partage de puissance dans une boucle de tension et courant interne. L'angle de puissance est lié à la puissance active, tandis que la tension est liée à la puissance réactive

Le contrôle de statisme P /Q peut être exprimé comme suit :

$$w = w_{ref} - m_p * P$$

$$E = E_{ref} - m_Q * Q \quad (\text{III.3})$$

Ou  $m_p$  et  $m_q$  sont la pente de statisme actif et réactif.

$w_{ref}$  et  $E_{ref}$  sont la vitesse angulaire nominale et la tension nominale respectivement, les coefficients de statisme ont une grande influence sur le système.

Le  $m_p$  et  $m_q$  peuvent être formulés comme suit :

$$\begin{aligned}
 m_p &= \frac{W_{max} - W_{min}}{P_{max} - P_{min}} \\
 n_q &= \frac{E_{max} - E_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}
 \end{aligned}
 \tag{III.4}$$

### III.2 .7.2 Tension puissance active (vpd) et contrôle de statisme de puissance réactive en fréquence(FQD) :

Les départs de distribution basse tension sont principalement résistifs. là par conséquent le contrôle conventionnel du statisme ne fonctionne pas sous ces conditions, pour un départ purement résistif l'angle de phase  $\theta$  est petite et  $\cos(\theta)=1$ . Sur la base de ces hypothèses la puissance réelles et réactive peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{V_0 * E - V_0^2}{Z} \\
 Q &= -\frac{V_0 * E}{Z} \sin(\delta)
 \end{aligned}
 \tag{III.5}$$

Par conséquent, la tension –puissance réelles modifiée (P-V) et les schémas de statisme fréquence – puissance réactive (Q-F) sont :

$$\begin{aligned}
 E &= E_{ref} - m * P \\
 w &= w_{ref} - n * Q
 \end{aligned}
 \tag{III.6}$$

Ou m et n sont des coefficients de statisme actif et réactif respectivement.

### III.2 .7.3 Contrôle d'angle :

Le contrôle du statisme angulaire est semblable au contrôle du statisme classique (P-F) et (Q-V), pour l'angle de statisme, l'angle de tension( $\delta$ ) est lié à la puissance active (P) au lieu de la fréquence (F), le  $\delta$  d'un DER peut être calculé à partir de :

$$\delta = \int w dt \quad (\text{III.7})$$

Le contrôle de statisme d'angle est utilisé pour équilibrer la puissance, les équations de tension et l'angle de phase sont :

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_{ref} - n_P(P - P_{ref}) \\ E &= E_{ref} - n_Q(Q - Q_{ref}) \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

$\delta_{ref}$  est le déphasage de référence du DER, l'angle de statisme assure un partage de charge approprié entre les DERs, par conséquent l'écart de fréquence est faible, cependant si les convertisseurs de puissance ne sont pas correctement synchronisés, les retards de traitement de l'horloge de processeur numérique font une légère différence de fréquence entre les convertisseurs qui peuvent causer des problèmes de synchronisation de phase et finalement le micro-réseau devient instable [38].

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons bien défini d'une manière général la stabilité des micro-réseaux, ses différents types et les causes principales conduisant à l'instabilité.

Après on a bien détaillé la stabilité dans les micro-réseaux de type alternatif.

## Chapitre IV Simulation et analyse de cas pratique

### Introduction

La simulation d'un système nous permet d'avoir une vue réelle sur son comportement avant sa mise en œuvre sur le terrain. Cette simulation nous permet d'avoir des résultats très proches du réel.

Dans ce chapitre, nous allons voir la simulation d'un micro-réseau alimenté en alternatif en interprétant les résultats obtenus.

Le travail sera concentré sur l'étude de l'état du réseau pour cinq scénarios différents :

- Sans perturbation.
- L'influence de la variation du gain de statisme de la puissance active ( $M_p$ ) sur: la fréquence, le courant de la ligne, le courant de la charge et celui des convertisseurs, ainsi que la tension.
- L'influence de la variation du gain de statisme de la puissance réactive ( $M_q$ ) sur: la fréquence, le courant de la ligne, le courant de la charge et celui des convertisseurs, ainsi que la tension.
- L'influence de la variation des paramètres de la charge ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ) sur: la fréquence, le courant de la ligne, le courant de la charge et celui des convertisseurs, ainsi que la tension.
- L'influence de la variation de multiple charges sur: la fréquence, le courant de la ligne, le courant de la charge et celui des convertisseurs, ainsi que la tension.

### IV.1. Schéma électrique du micro-réseau à étudier

Un micro-réseau typique discuté dans cette étape est illustré dans la figure **IV.1**.

Il contient deux DG qui sont tous supposés être de source DC en raison du fait que la plupart des types de sources d'énergie tels que le vent ou le solaire peuvent être considérés comme une source du courant continu après rectification après une conversion de l'énergie produite.

Chaque DG connecte une charge statique locale via un onduleur à trois branches.

Un filtre LC, LF et CF, et une inductance de couplage LC, puis se connecte au bus AC avec une charge commune vers l'impédance de ligne R ligne et L ligne quand le point commun de couplage (PCC) reliant le bus AC et le réseau électrique public est désactivé, le micro-réseau fonctionnera en mode autonome.



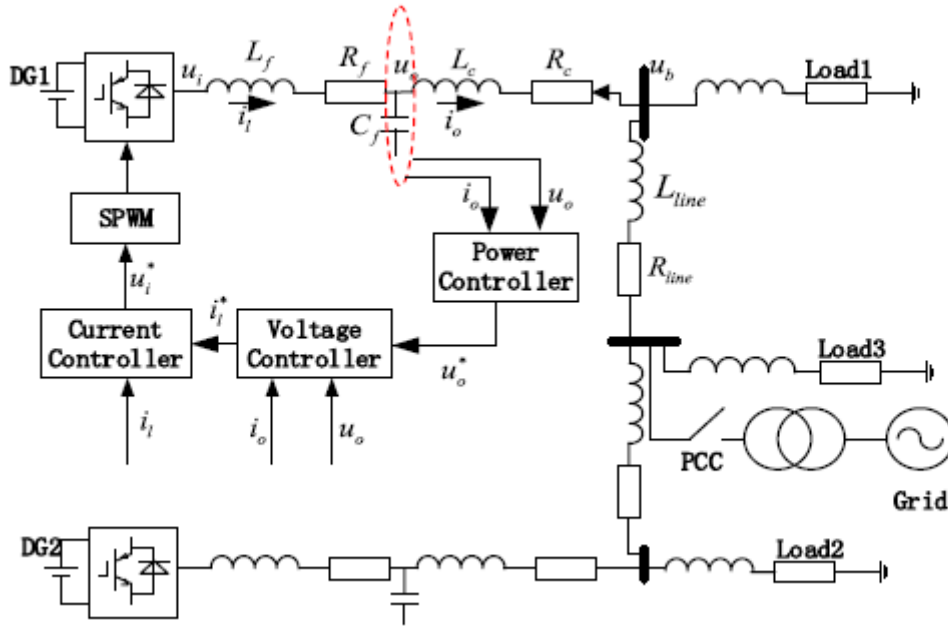


Figure IV.1 : Schéma électrique du micro-réseau.

Tableau. IV.1. Les valeurs des différents paramètres de simulation.

**Les paramètres de simulation**

| Les paramètres | valeur    |
|----------------|-----------|
| Un             | 311 v     |
| F              | 50 HZ     |
| WC             | 314 rad/s |
| MP             | 1,03e-5   |
| Mq             | 2 ,95 e-4 |
| Kpu            | 10,11     |
| Kiu            | 100       |
| Kpc            | 10        |

|     |            |
|-----|------------|
| kie | 0,12       |
| Cf  | 1500 mF    |
| Rf  | 0,15 ohm   |
| Lf  | 1,5 e-3 H  |
| RL  | 0,147 ohm  |
| LL  | 1,63 e-3 H |
| Rc  | 0,05 ohm   |
| Lc  | 0,5 e-3 H  |
| Rch | 10 ohm     |
| Lch | 0,1 H      |
| RN  | 1000 ohm   |

#### IV.2. Simulation du système global avec MATLAB

Le schéma de simulation du système globale pour l'étude de la stabilité des micro-réseaux sous MATLAB/SIMULINK est illustré sur la figure IV.2

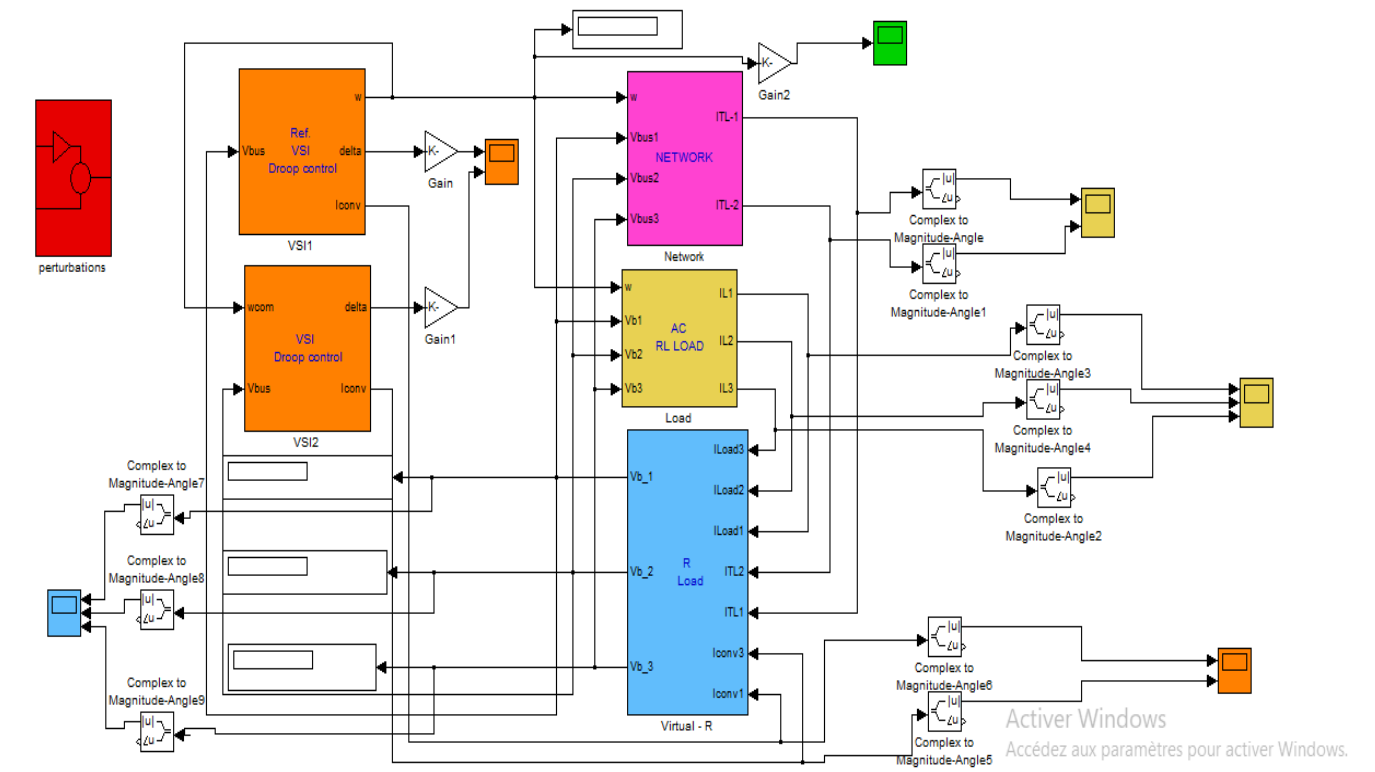


Figure IV.2 : Montage global de simulation.

### IV.3. Résultats de simulation

Après la réalisation du montage sur MATLAB\Simulink on a obtenu les résultats suivants :

#### IV. 3 .1. Sans perturbation :

Dans cette étape, la fréquence, les trois tensions vb1, vb2, vb3, le courant (des lignes 1-2 et 2-3, des charges 1, 2,3, et les convertisseurs 1 et 2) sont visualisés dans le cas sans perturbation.

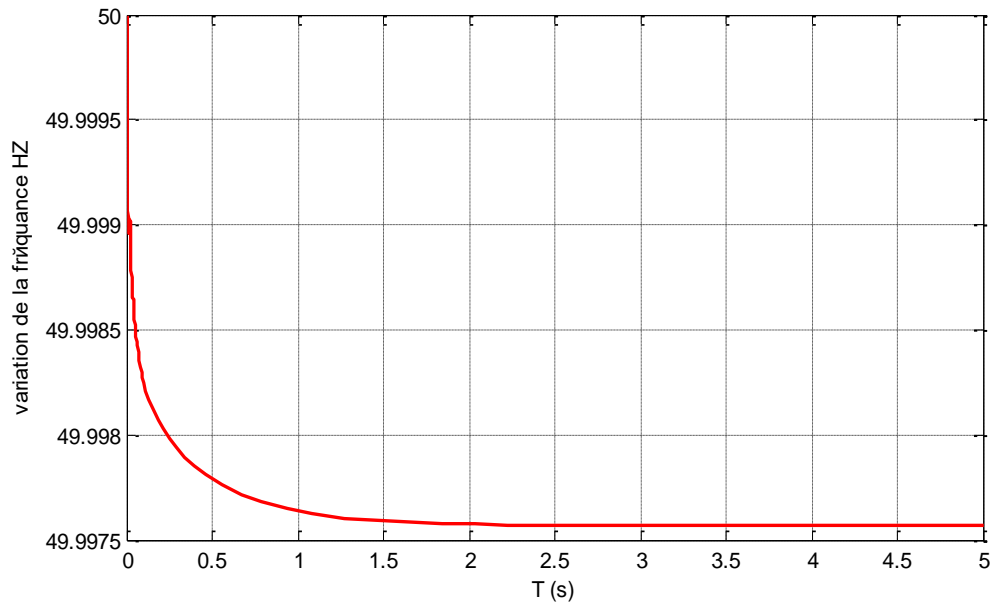


Figure IV. 3. Variation de la fréquence en fonction du temps sans perturbation.

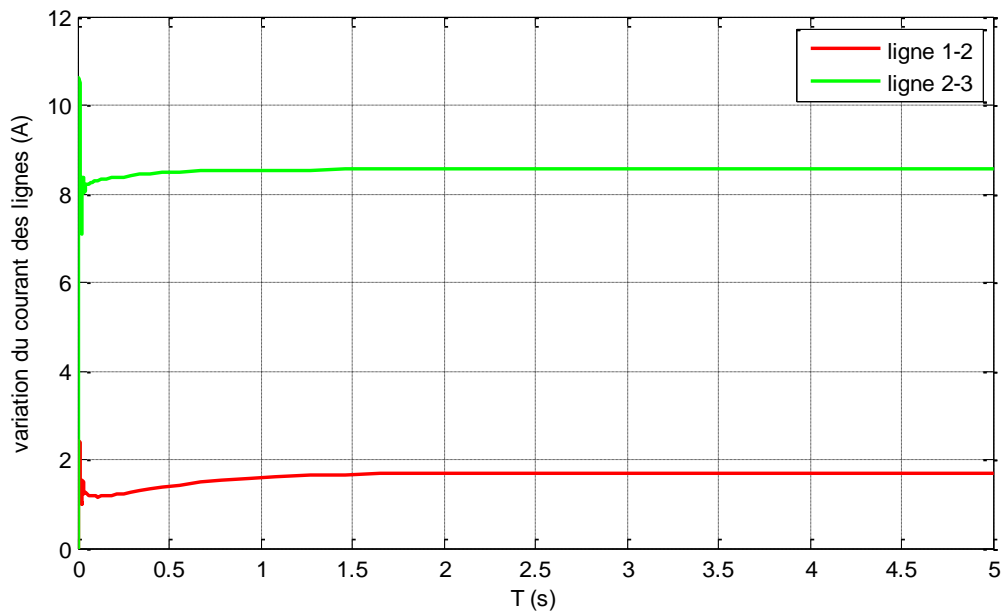
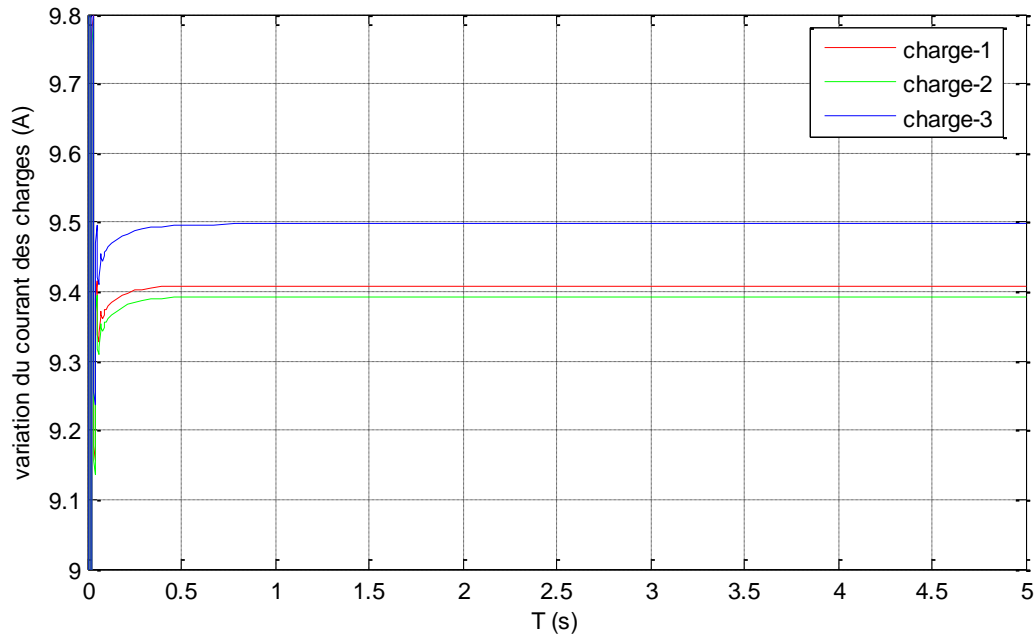
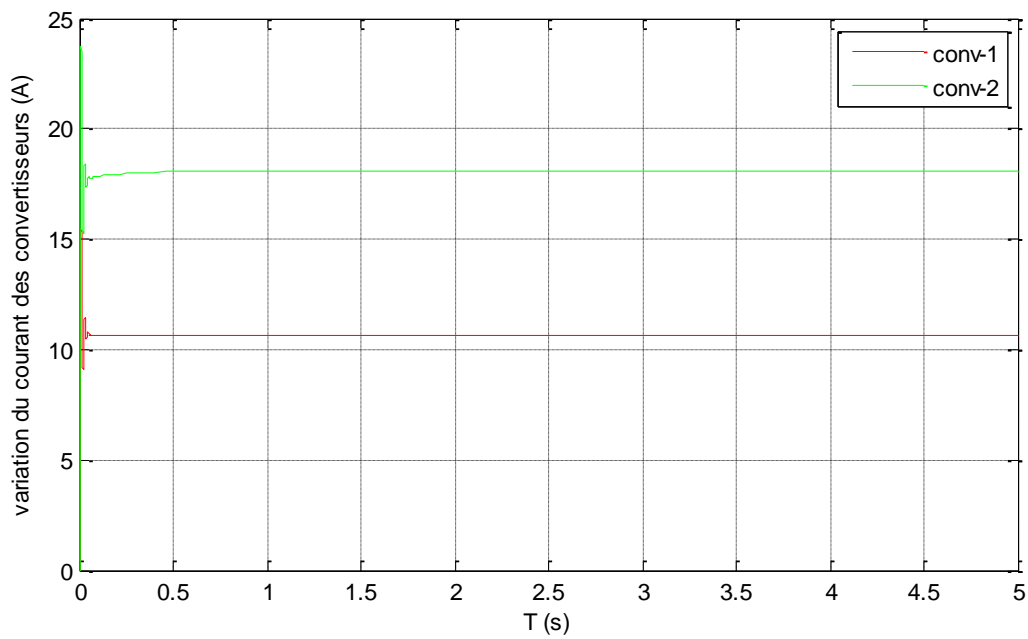


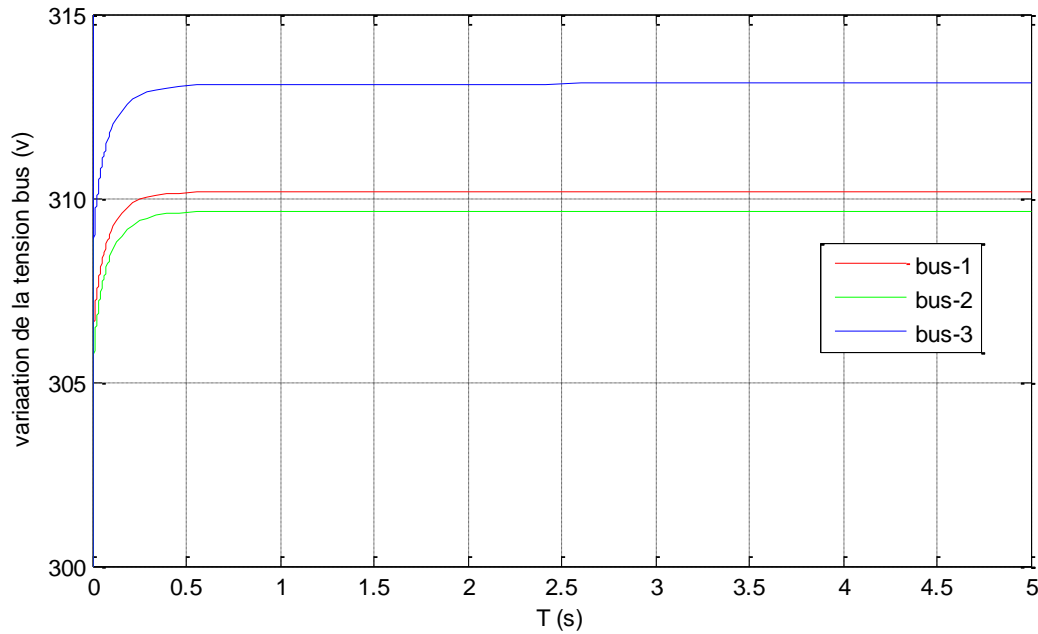
Figure IV.4. Variation de l'intensité du courant des lignes en fonction du temps sans perturbation.



**Figure IV.5.** Variation de l'intensité du courant des charges en fonction du temps sans perturbation.



**Figure IV.6.** Variation de l'intensité des courants de convertisseur en fonction du temps sans perturbation.



**Figure IV.7.** Variation des tensions en fonction du temps sans perturbation.

### Interprétation

- Dans le régime permanent sans perturbation, on a fixé la valeur de fréquence à 50HZ.

On remarque à partir de la figure IV.3 que la valeur de la fréquence subit une très petite diminution à  $f=49,997\text{HZ}$ , et elle se stabilise presque à cette valeur à l'instant  $T=2\text{s}$ .

- Pour l'intensité des lignes (1-2, 2-3) représenté dans la figure IV.4 on remarque que les courants se stabilisent avec le temps.

Pour le premier cas de la ligne (1-2) on remarque qu'il se stabilise à  $T=0,25\text{s}$  la valeur de courant  $I=1,7\text{A}$ .

Pour la ligne (2-3) on voit qu'il se stabilise à  $T=0,6\text{s}$  a une valeur de  $8,2\text{A}$ .

- Pour l'intensité de courant des charges (1, 2,3) représenté dans la figure IV.5 on remarque une stabilité des trois charges à ces valeurs suivantes :

Pour la première charge, elle se stabilise à  $9,41\text{ A}$ .

Pour la deuxième charge, elle se stabilise à  $I= 9,39\text{ A}$ .

Pour la troisième charge, elle se stabilise à  $9,5\text{ A}$ .

- La figure IV.6 montre la variation du courant des deux convertisseurs en fonction du temps.

D'après la figure on observe une stabilité des deux convertisseurs à  $T=0,1s$  pour le deuxième convertisseur tandis que pour le premier à se stabiliser à  $T=0,5s$ .

Pour le premier convertisseur on remarque qu'il se stabilise à une valeur de  $I_{conv1} = 11 A$ .

Pour le deuxième convertisseur il prend la valeur de  $17 A$  et il stabilise à cette valeur à l'instant  $T = 0,5 s$ .

- Dernièrement, pour la variation des tensions en fonction du temps représenté dans la figure IV.7.

On remarque une augmentation des trois charges à l'instant  $T = 0s$  à  $T=0,5 s$  par rapport à leurs valeurs de référence.

Pour la première tension  $V_{b1}$  elle augmente de  $306 v$  à  $310,1 v$ , et elle se stabilise à cette valeur à l'instant  $T = 0,5 s$ .

Pour la deuxième tension  $V_{b2}$  on remarque qu'elle augmente aussi de  $306$  à  $309 V$  et elle se stabilise à cette valeur à partir de  $T = 0,5 s$ .

Pour la troisième charge, elle subit une augmentation de  $306v$  jusqu'à  $313 V$ , elle se stabilise à l'instant  $T = 0,5 s$ .

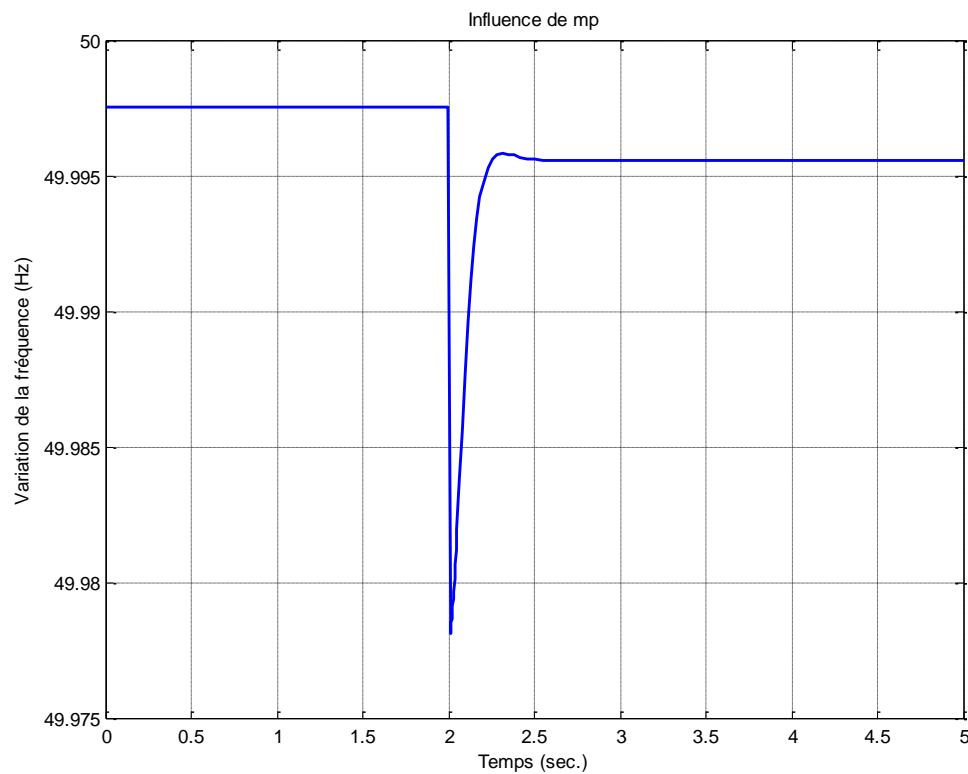
On peut constater que la déviation disparaît presque totalement dans le régime permanent.

|                  |                |                    |         |
|------------------|----------------|--------------------|---------|
| F                | 49.9976 HZ     | I <sub>ch3</sub>   | 9.5 A   |
| W                | 313 .98 rad /s | I <sub>conv1</sub> | 11 A    |
| IL1-2            | 1.7 A          | I <sub>conv2</sub> | 17 A    |
| IL2-3            | 8.2 A          | V <sub>b1</sub>    | 310.1 V |
| I <sub>ch1</sub> | 9.41 A         | V <sub>b2</sub>    | 309 V   |
| I <sub>ch2</sub> | 9 .39 A        | V <sub>b3</sub>    | 313V    |

Tableau. IV.2. Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors cas sans perturbation.

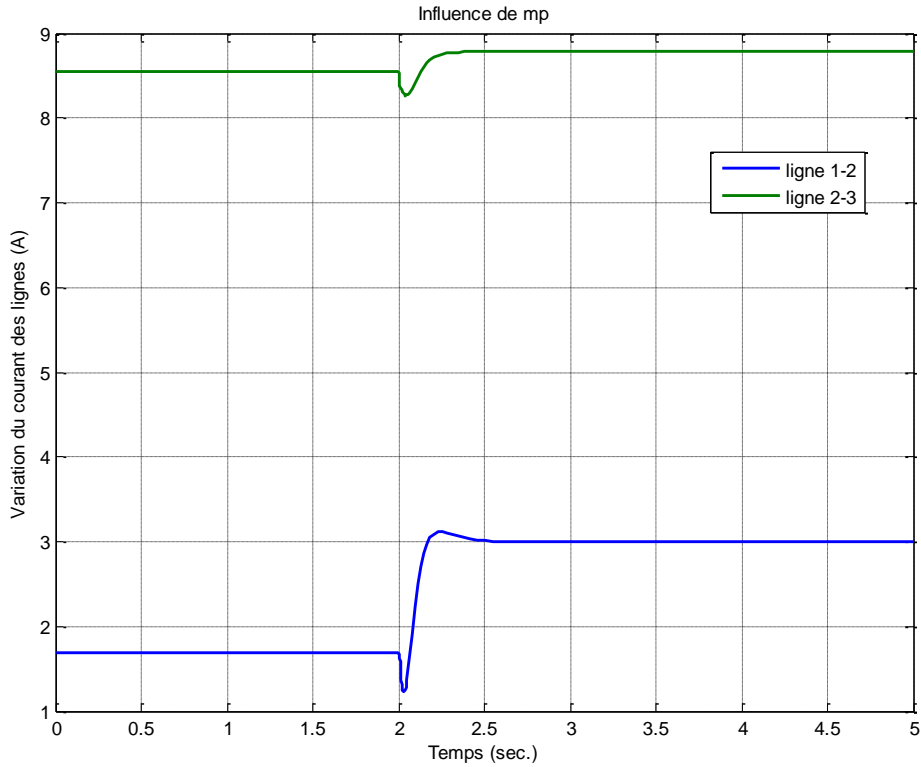
**IV. 3 .2. Variation du gain de statisme de la puissance active (Mp):**

Dans cette étape, on va voir l'effet de la variation du gain de statisme de puissance active  $M_p$ , sur la fréquence, les trois tensions  $v_{b1}$ ,  $v_{b2}$ ,  $v_{b3}$ , le courant des lignes (1-2 et 2-3), le courant des charges (1,2,3), et le courant des convertisseurs (1 et 2).

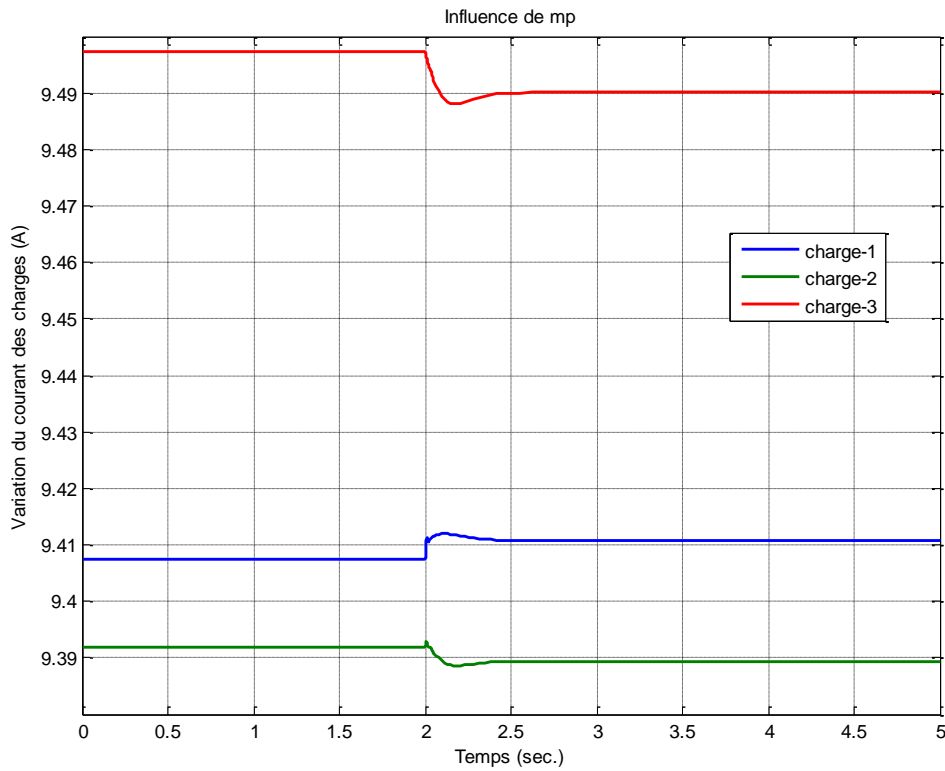


**Figure IV.8.** Influence de la variation du gain de statisme de puissance  $M_p$  sur la fréquence.

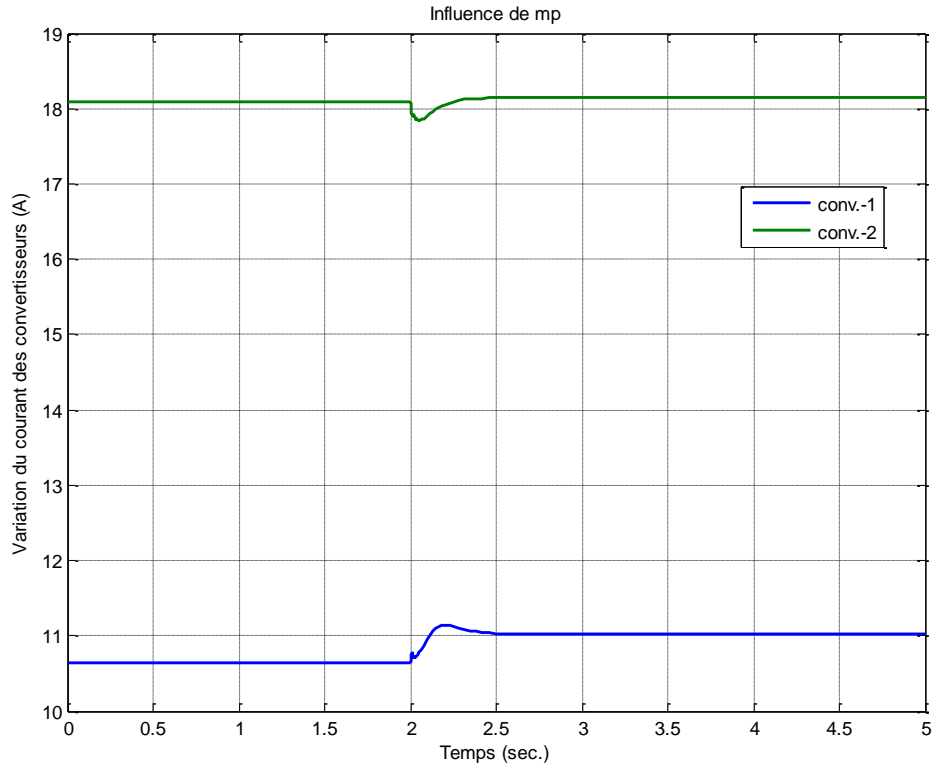




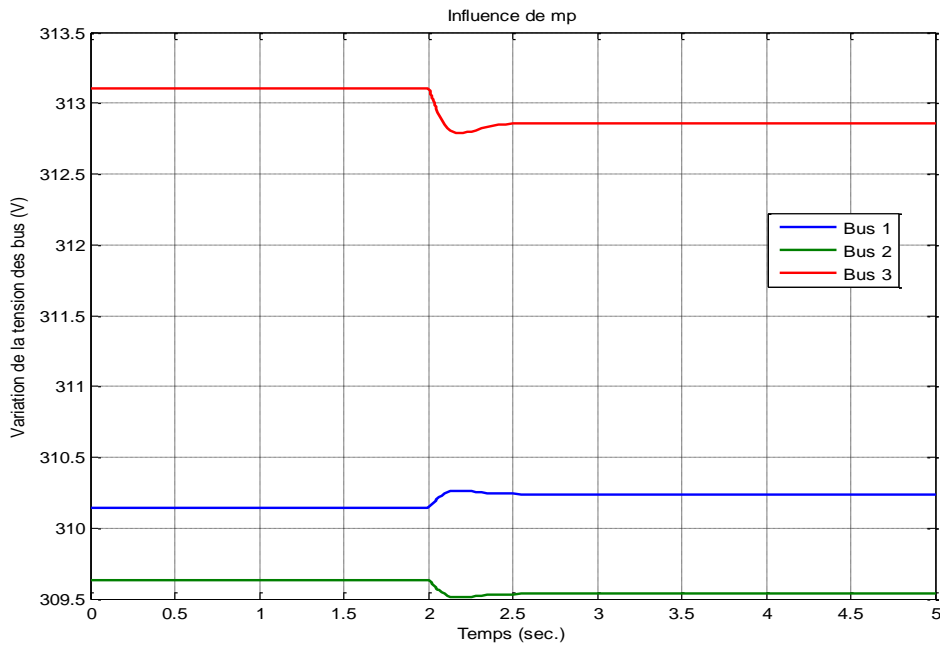
**Figure IV.9.** Influence de la variation du gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de la ligne.



**Figure IV.10.** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de la charge.



**Figure IV.11.** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur l'intensité de courant de convertisseur.



**Figure IV.12.** Influence de la variation de gain de statisme de puissance  $M_p$  sur la tension.

### Interprétation

La figure IV.8 montre la variation de la fréquence du système en fonction du temps.

On remarque que la fréquence se stabilise au début à une valeur de 49,997 HZ, de  $T=0s$  à  $T=2s$ . Puis on observe un pic à  $T = 2 s$  qui atteint la valeur de 49,978 Hz.

Une augmentation de la fréquence à la valeur de 49,996 Hz pour qu'elle stabilise presque à cette valeur à partir de  $T = 2,5 s$ .

Pour l'intensité de courant des lignes (1-2) et (2-3) représenté dans la figure IV.9, on remarque une stabilité des courants de  $T=0$  à  $T=2s$  à des valeurs de 1,8 A et 8,6A pour les courants de ligne (1-2) et (2-3) respectivement.

Puis une observe une très petite diminution pour les deux courants de ligne suivit rapidement d'une augmentation à la valeur de 3 A pour la ligne (1-2) et il stabilise à cette valeur à partir de  $T = 2,5 s$ .

Pour l'intensité de courant de ligne (2-3), on voit qu'il se stabilise à une valeur de 8,9 A à l'instant de  $T= 2,8 s$ .

Pour le courant des trois charges représentés dans la figure IV.10, on remarque que les trois courants des charges se stabilisent au début de  $T = 0s$  à  $T=2 s$  à des valeurs de 9,408 A, 9,3902A, 9,498 A pour les charges (1, 2, 3) respectivement.

Après, on voit une augmentation non importante pour la première charge, et ensuite elle stabilise à 9,4101A à partir de  $T = 2,5 s$ .

Pour la deuxième charge on remarque aussi une diminution non importante pour qu'elle se stabilise à 9,389A à partir de  $T=2,5s$ .

Finalement pour la troisième charge, elle subit une diminution à la valeur de 9,49 A, pour qu'elle se stabilise à cette valeur.

La figure IV.11 montre la variation de Courant des deux convertisseurs en fonction du temps.

Premièrement, une stabilité est montrée au début pour les deux convertisseurs de  $T = 0s$  à  $T= 2 s$ , à 10,7 et 18,1 pour le convertisseur 1 et 2 respectivement.

Ensuite on remarque une petite augmentation pour le premier convertisseur à une valeur de 11 A, et il stabilise à cette valeur à partir de  $T = 2,5 s$ .

En ce qui concerne le deuxième convertisseur, on voit qu'il subit une très petite diminution puis il se stabilise à  $I_{cnv2} = 18,2A$  à partir de  $T=2,5s$

Pour la variation des tensions (1, 2, 3) en fonction du temps représenté dans la figure IV.13.

On remarque la stabilité des trois charges de  $T = 0s$  à  $T=2s$  à 310.15 V pour la première tension et 309,6 V pour la deuxième tension et 313,1 V pour la dernière tension.

La première tension augmente un peu à une valeur de 310,2 V, et stabilise à cette valeur à  $T=2,5$  s.

Pour la deuxième tension, on voit qu'elle diminue à 309,5 v pour qu'elle augmente encore une fois à 309,55v, et se stabilise à cette dernière à  $T=2,5s$ .

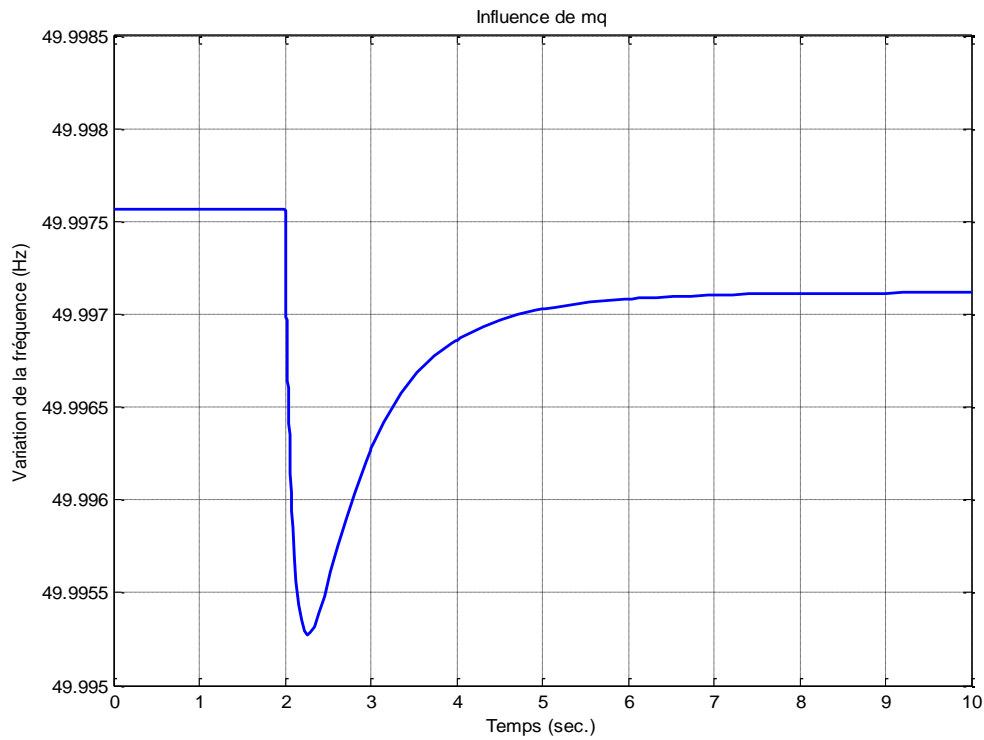
Et pour la troisième tension on observe qu'elle diminue à 312.80 V, et elle se stabilise à cette valeur à l'instant  $T=2 .5$  s.

|       |                |        |          |
|-------|----------------|--------|----------|
| F     | 49.996 HZ      | Ich3   | 9.49 A   |
| W     | 313 .97 rad /s | Iconv1 | 11 A     |
| IL1-2 | 3 A            | Iconv2 | 18 ,2 A  |
| IL2-3 | 8.9 A          | Vb1    | 310.2 V  |
| Ich1  | 9.4101 A       | Vb2    | 309.55 V |
| Ich2  | 9 .389A        | Vb3    | 312.8V   |

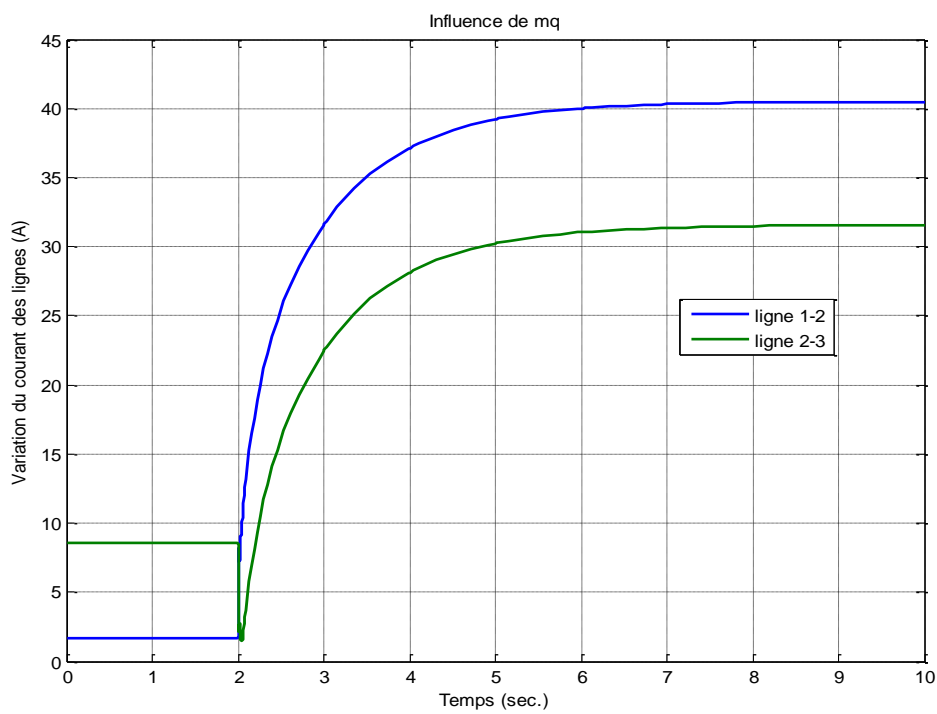
Tableau. IV. 3. Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de la variation du gain de statisme de la puissance active MP.

#### IV. 3 .1. Variation du gain de statisme de puissance réactive (Mq) :

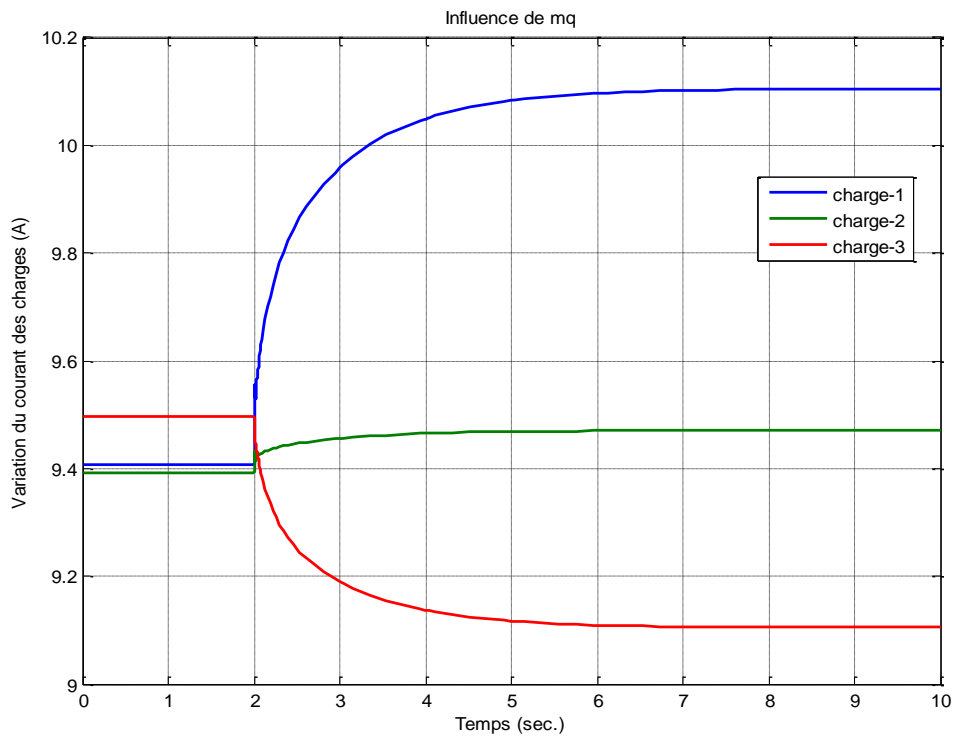
Dans cette étape, on va étudier l'influence de la variation du gain de statisme de la puissance réactive (Mq), sur la fréquence, les trois tensions (vb1, vb2, vb3), le courant des lignes (1-2) et (2-3), le courant des charges (1,2,3), et ainsi que le courant des convertisseurs (1 et 2).



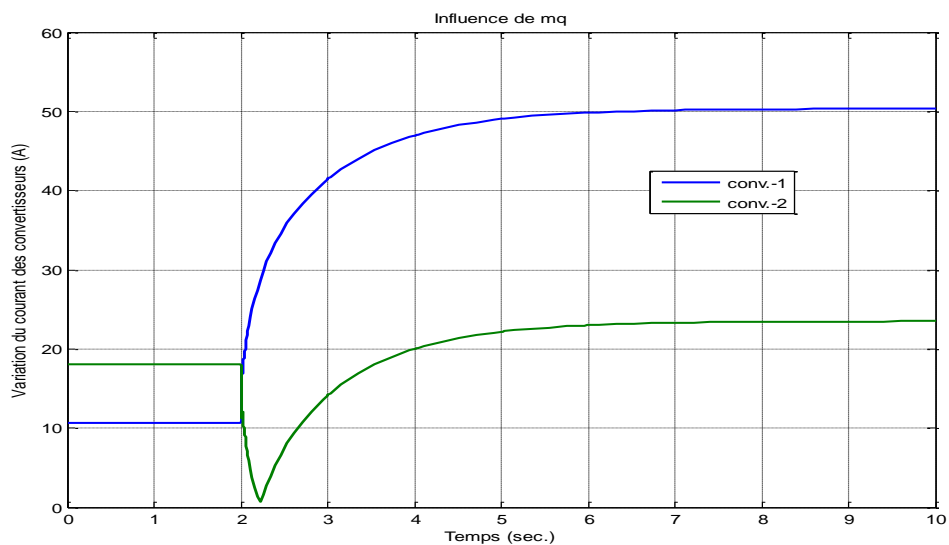
**Figure IV.13.** Influence de la variation du gain de statisme de puissance réactive  $M_q$  sur la fréquence.



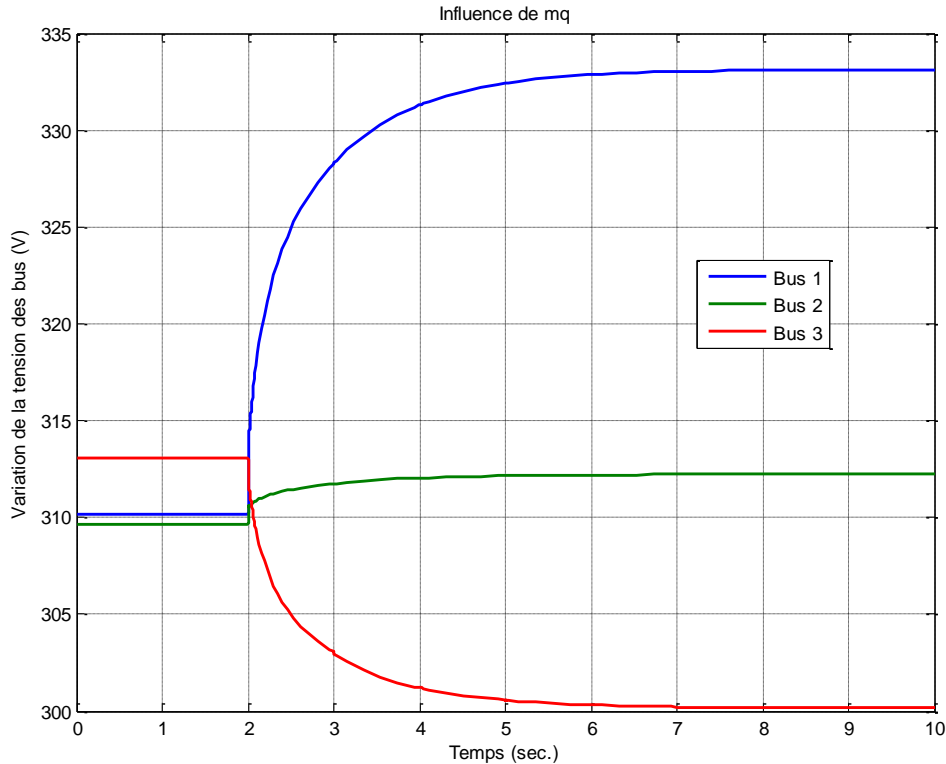
**Figure IV.14.** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de la ligne.



**Figure IV.15.** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de la charge.



**Figure IV.16.** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur l'intensité de courant de convertisseur.



**Figure IV.17.** Influence de variation de gain de statisme de puissance  $M_q$  sur la tension.

### Interprétation

- La figure IV.13 montre la variation de la fréquence en fonction du temps.

On remarque que la fréquence se stabilise au début de  $T=0s$  jusqu'à  $T=2s$  à la valeur de 49,9976 Hz, puis on observe un pic à l'instant  $T = 2,2s$  qui atteint la valeur de 49,9953Hz, puis elle augmente jusqu'à elle se stabilise à 49,9971 Hz à l'instant  $T=7,3s$ .

- Pour la variation de l'intensité des courants de lignes (1-2) et (2-3) en fonction du temps représenté dans la figure IV.14.

On remarque que les courants des lignes se stabilisent de  $T=0s$  à  $T=2s$  à 1A et 3A pour les deux lignes (1-2) et (2-3) respectivement.

Après, on voit une augmentation importante du courant pour la ligne (1-2), il atteint la valeur de 40,5 A et il stabilise à cette dernière à  $T = 8s$ .

Pour la ligne (2-3), on remarque une augmentation moins importante que celle de la ligne (1-2).

Le Courant de la ligne (2-3) atteint la valeur de 32 A et il stabilise à cette valeur à l'instant  $T = 8s$ .

- La figure IV.15 représente la variation de différentes charges (1, 2, 3) en fonction du temps.

On voit une stabilité des trois charges au début de  $T=0$  à  $T=2s$  à 9.41A pour la première charge, 9,39 pour la deuxième charge, 9,5 pour la troisième charge.

Après, à partir de  $T=2$  s, on remarque une augmentation importante pour la première charge à une valeur de 10,1 A, et il stabilise à cette dernière à partir de  $T = 8$  s.

Pour la deuxième charge, on remarque une petite augmentation du courant à la valeur 9, 47 A, et elle stabilise à cette dernière à  $T= 6$  s.

Après, pour la dernière charge on observe qu'elle diminue à une valeur de 9,1 A, et elle stabilise à cette dernière a  $T=7$  s.

- La variation du courant des convertisseurs (1) et (2) en fonction du temps est montrée dans la figure IV.16.

Au début, on remarque que les deux convertisseurs (1) et (2) se stabilisent à des valeurs de 11 A et 18 A respectivement, après on observe une augmentation importante pour le premier convertisseur à une valeur de 51 A à partir de  $T = 9$  s.

Pour le deuxième convertisseur, on observe un pic à l'instant  $T = 2,2$  s qui prend la valeur de 1 A ensuite le Courant augmente à une valeur de 24 A, et il se stabilise à cette valeur à  $T = 8s$ .

- La figure IV.17 représente la variation des tensions en fonction du temps, au début toutes les trois tensions se stabilisent de  $T = 0s$  à  $T = 2$  s à 310,5 v pour la première et 309 v pour la deuxième, et 313 v pour la troisième.

Ensuite, on remarque une augmentation importante pour la première tension à une valeur de 333V, il stabilise à cette valeur à partir de  $T = 8$  s.

Pour la deuxième tension, on voit qu'elle augmente aussi à 312,5 v et elle stabilise à cette dernière à partir de  $T= 7$  s.

Pour la troisième tension, on observe qu'elle marque une diminution importante, elle atteint la valeur 300.5 v, et elle se stabilise à cette valeur à  $T=7s$

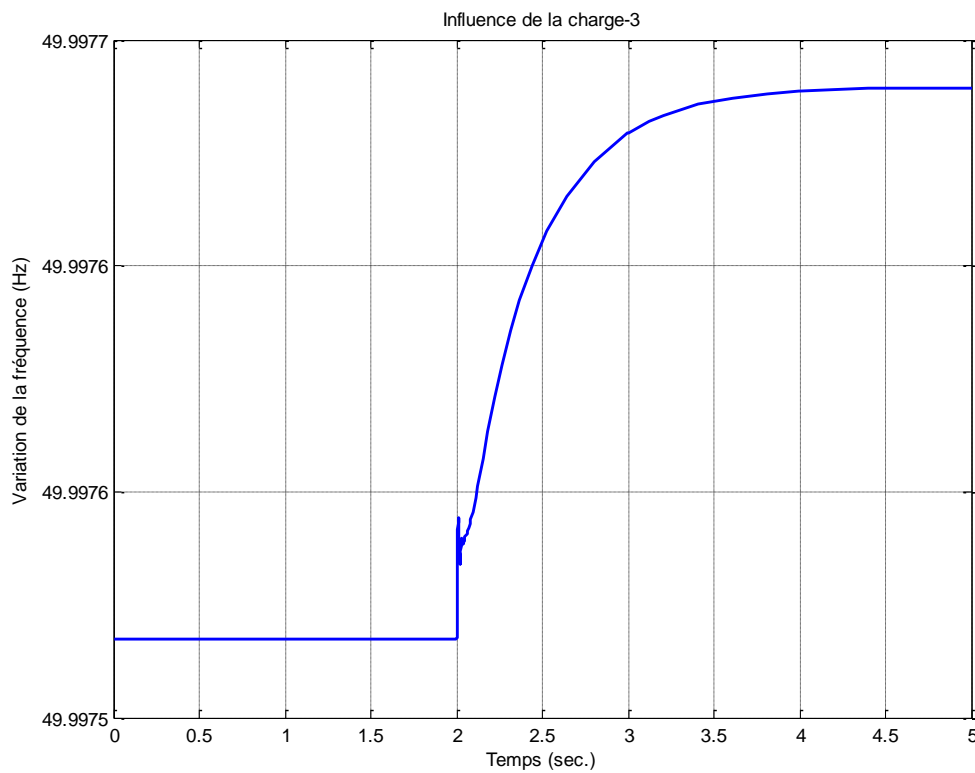
|       |                 |        |         |
|-------|-----------------|--------|---------|
| F     | 49.9971 HZ      | Ich3   | 9.1 A   |
| W     | 313 .9817 rad/s | Iconv1 | 51 A    |
| IL1-2 | 40.5 A          | Iconv2 | 24 A    |
| IL2-3 | 32 A            | Vb1    | 333 V   |
| Ich1  | 10.1 A          | Vb2    | 312.5 V |
| Ich2  | 9 .47 A         | Vb3    | 300.5 V |



Tableau. IV.4. Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de variation de gain de statisme de puissance réactive  $M_q$ .

### IV. 3. Influence de la variation de la charge RL:

Dans cette étape, on va savoir l'effet de la variation de la charge, sur la fréquence, les trois tensions  $v_{b1}$ ,  $v_{b2}$ ,  $v_{b3}$ , le courant des lignes (1-2) et (2-3), le courant des charges (1, 2,3,) et le courant des convertisseurs (1 et 2).



**Figure IV.18.** Influence de la charge RL sur la fréquence.

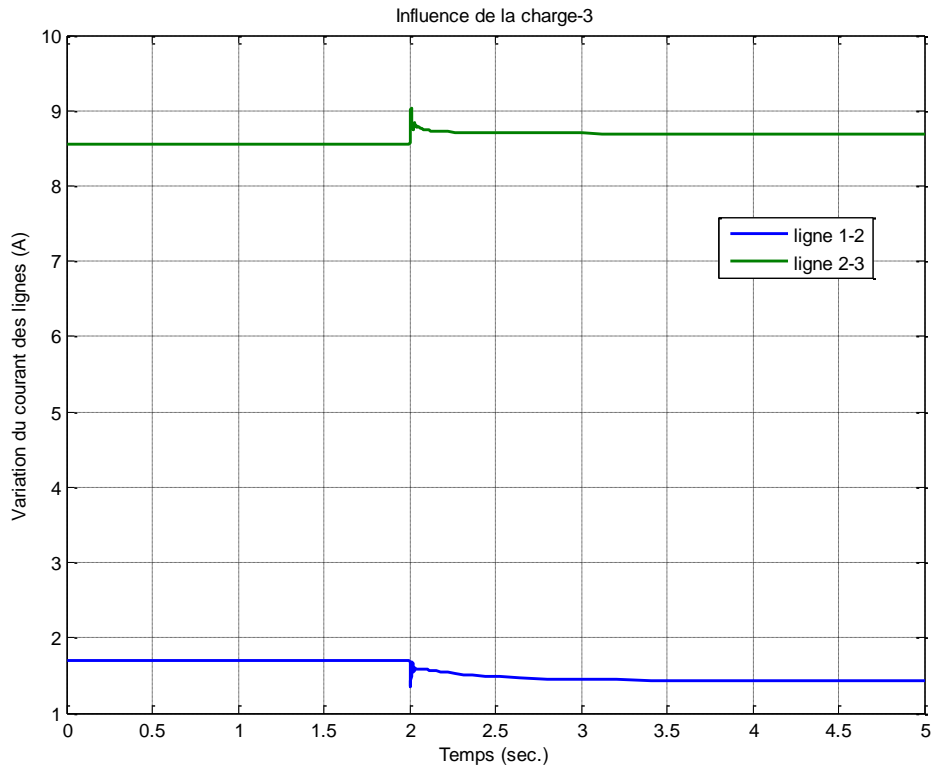


Figure IV.19. Influence de la charge RL sur l'intensité du courant de la ligne.

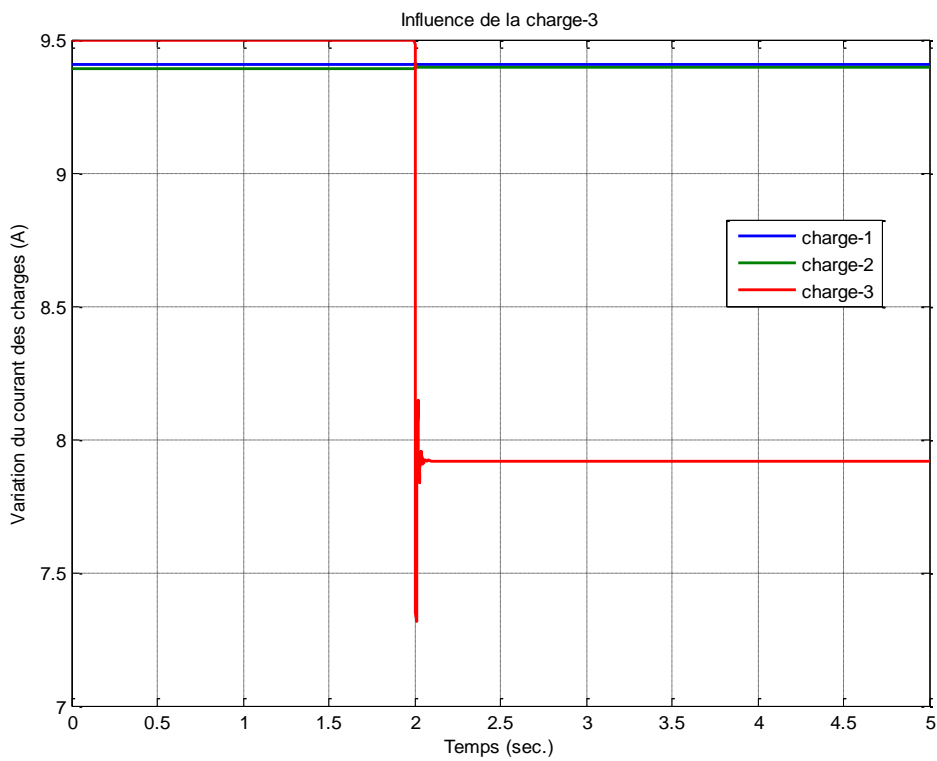


Figure IV.20. Influence la charge RL sur l'intensité du courant de la charge.

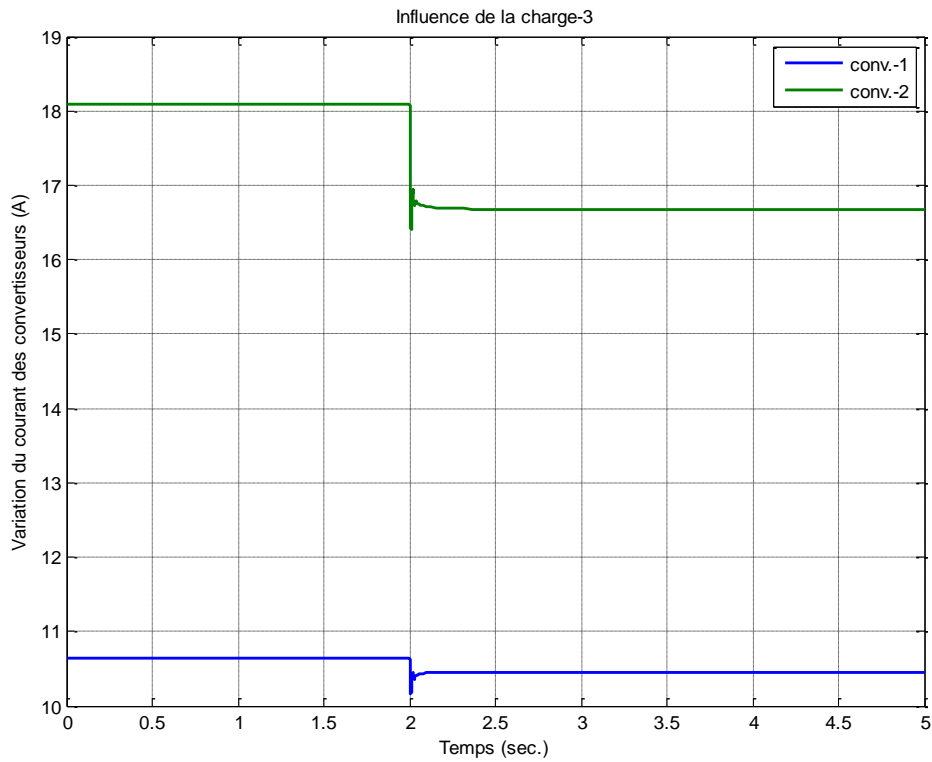
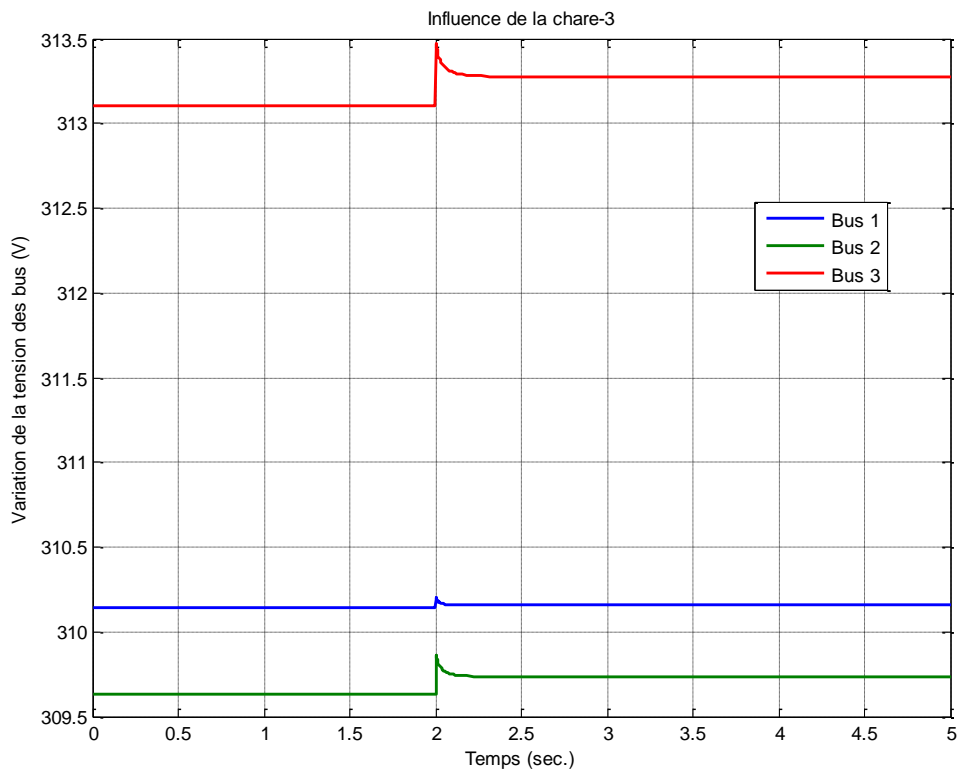


Figure IV.21. Influence de la charge RL sur l'intensité du courant de convertisseur.



**Figure IV.22.** Influence de la charge RL sur la tension.

### Interprétation

Dans cette étape, on va savoir l'effet de la variation de la charge 3, sur la fréquence, les trois tensions  $v_{b1}$ ,  $v_{b2}$ ,  $v_{b3}$ , le courant des lignes (1-2) et (2-3), le courant des charges (1,2,3), et le courant des convertisseurs (1 et 2).

- **La figure IV.18** représente l'influence de la charge 3 sur la fréquence.

On remarque que la fréquence se stabilise au début de  $T=0s$  à  $T=2s$  à une valeur de 49,99753HZ après, on observe une augmentation à 49,99767 HZ et stabilise à cette valeur dernière à partir de  $T=4,5$  s.

- **La figure IV.19**, montre la variation du courant des lignes (1-2) et (2-3) en fonction du temps.

On remarque, une stabilité de courants des lignes (1-2) et (2-3), à des valeurs de 1,8 A et 8,7A respectivement de  $T=0$  s à  $T=2$  s.

Ensuite, on observe une diminution du courant de la ligne (1-2) à la valeur de 1,4 A et il stabilise à cette valeur à  $T=3,5$  s.

Pour le courant de la ligne (2-3), on remarque qu'il augmente à une valeur de 9 A puis il diminue à 8,8 A, pour qu'il stabilise à cette valeur à  $T = 3,1$  s.

- Pour la variation des courants de charges en fonction du temps, représenté dans **la figure IV.20.**

On remarque, une stabilité des charges (1 et 2) à  $T=0s$ , et elles restent toujours stable à une valeur de 9,43 A pour la première charge et 9,42 A pour la deuxième charge.

Pour la troisième charge on voit qu'elle stabilise au début de  $T=0$  s à  $T=2s$  à 9,5 A, après on observe un pic à l'instant  $T = 2s$ , qui atteint la valeur de 7,3 A, ensuite elle augmente encore une fois à la valeur de 7,9 A pour qu'elle stabilise à cette valeur à l'instant  $T=2,1s$ .

- **La figure IV.21**, montre la variation des courants de convertisseurs (1et 2) en fonction du temps.

On remarque une stabilité de courant des deux convertisseurs de  $T=0s$  à  $T=2s$ , à 10,8A pour le premier convertisseur, et 18,1A pour le deuxième convertisseur.

Ensuite, on voit que le courant du premier convertisseur se diminue un peu, pour qu'il stabilise à la valeur de 10,4 A à  $T=2,2$  s.

Pour le courant du deuxième convertisseur, on voit qu'il diminue à 16,5A, puis il stabilise à une valeur de 16,7 A à T=2,5s.

- Pour la variation des tensions (1 ,2 ,3) en fonction du temps qui est représenté dans la **figure IV.22.**

On voit, que les trois tensions se stabilisent au début de T=0s à T=2s à :

310 ,15 V pour la première tension.

309 ,6 V pour la deuxième tension.

313 ,1 V pour la troisième tension.

Puis on remarque que les trois tensions augmentent, par rapport à la première tension, elle atteint la valeur de 310 ,2 V puis elle stabilise à T =2 ,1 s à la valeur de 310,17 V.

Pour la deuxième tension, on voit qu'elle augmente un petit peu, puis elle se stabilise à T=2,5s à la valeur de 309,7V.

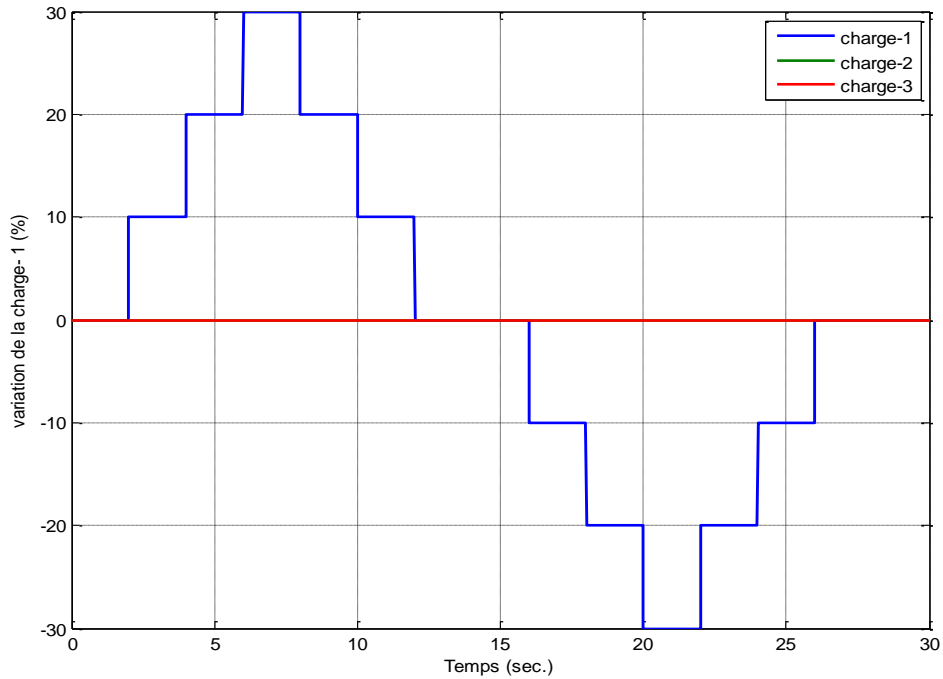
Pour la troisième tension, on remarque qu'elle augmente puis elle stabilise à 313, 3V à T=2,5s.

|       |                 |        |          |
|-------|-----------------|--------|----------|
| F     | 49.99767 HZ     | Ich3   | 7.9 A    |
| W     | 313.98536 rad/s | Iconv1 | 10.4 A   |
| IL1-2 | 1.4 A           | Iconv2 | 16.7 A   |
| IL2-3 | 8.8 A           | Vb1    | 310.17 V |
| Ich1  | 9.43 A          | Vb2    | 309.7 V  |
| Ich2  | 9 .42 A         | Vb3    | 313.3 V  |

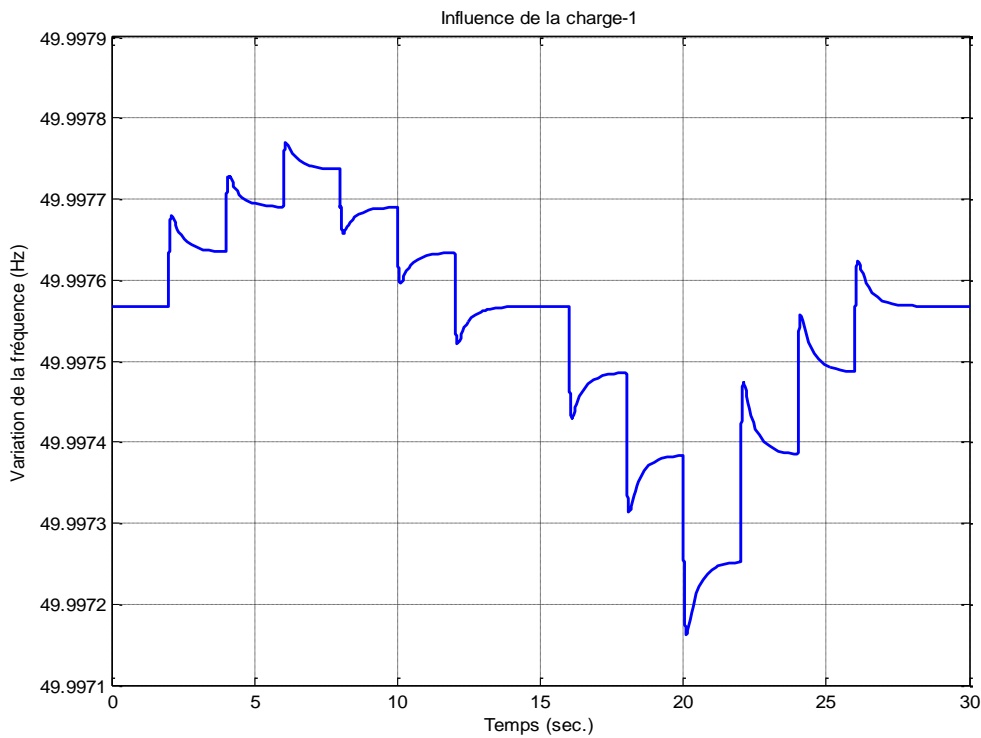
Tableau. IV. 5. Les valeurs finales des différents paramètres obtenues lors de la variation de la charge RL.

**IV. 4. Influence de la variation de multiple charges RL:**

Dans cette étape, on va savoir l'effet de la variation du multi charges, sur la fréquence, les trois tensions (vb1, vb2, vb3), le courant des lignes (1-2) et (2-3), le courant des charges (1, 2,3), et le courant des convertisseurs (1 et 2).



**Figure IV.23.** La variation multiple de la charge en fonction de temps.



**Figure IV.24.** Influence de multi charge sur la fréquence.

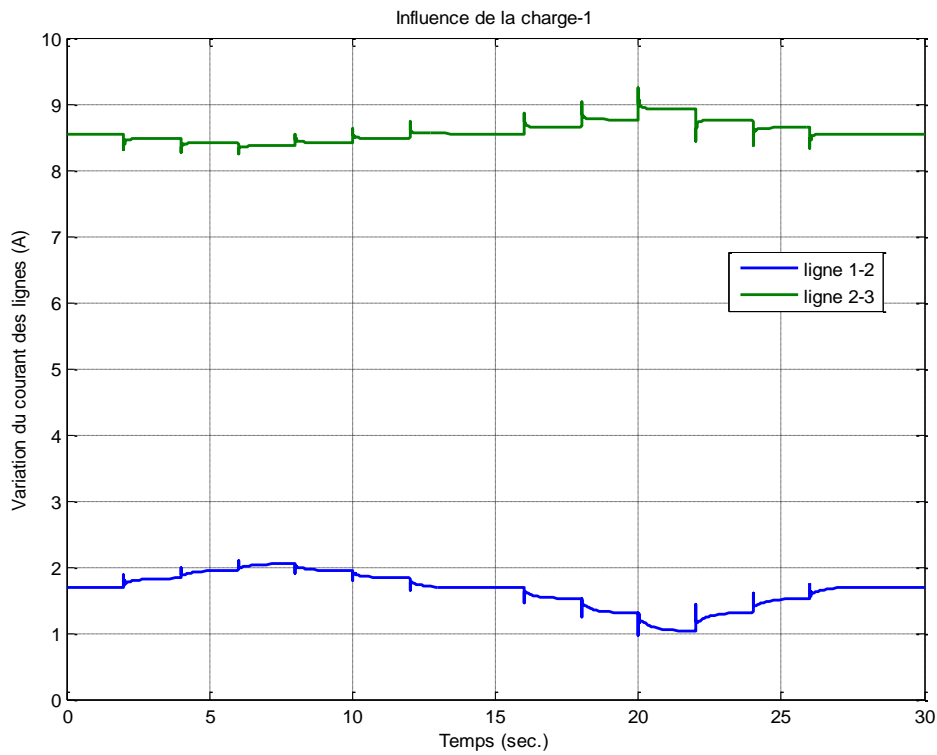


Figure IV.25. Influence de multi charges sur l'intensité du courant de la ligne.

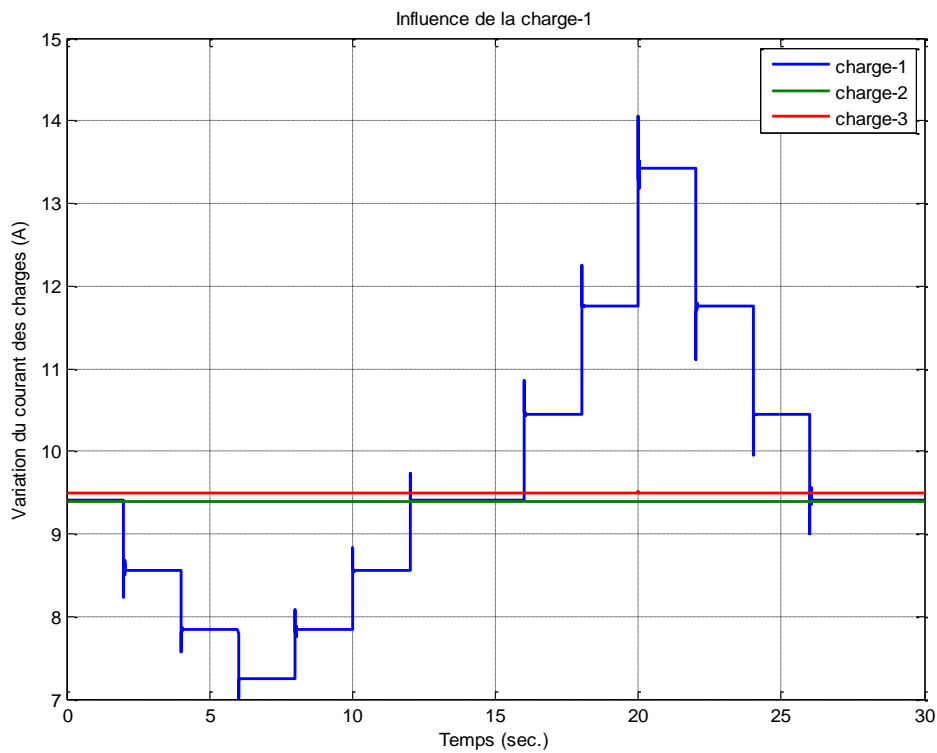


Figure IV.26. Influence multi charges sur l'intensité du courant de la charge.

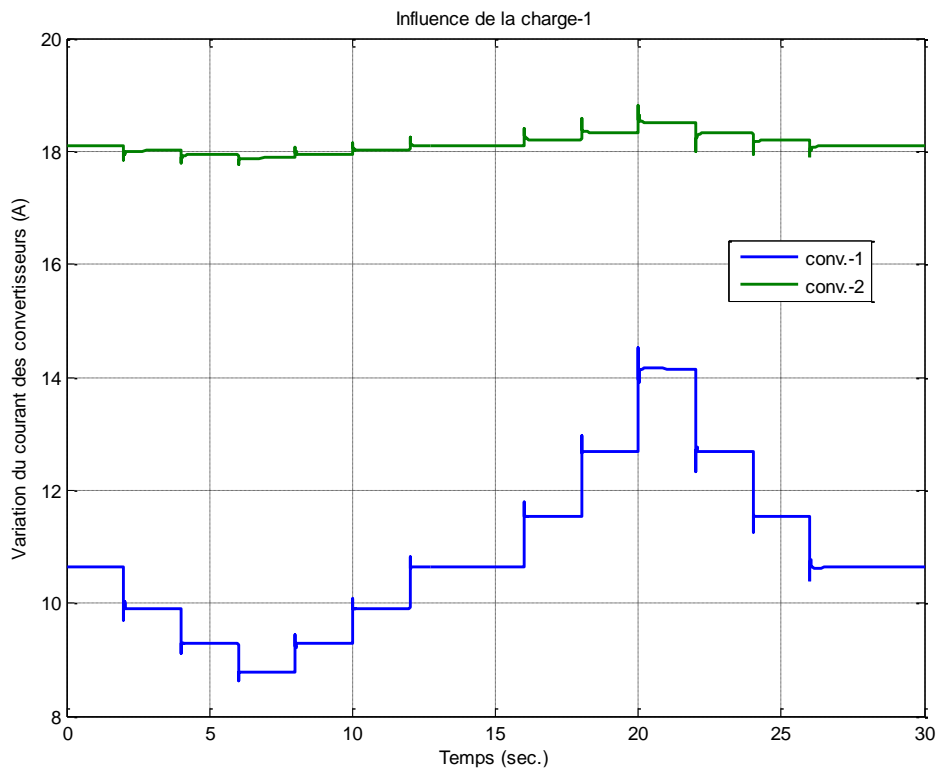


Figure IV.27. Influence de multi charges sur l'intensité du courant de convertisseur.

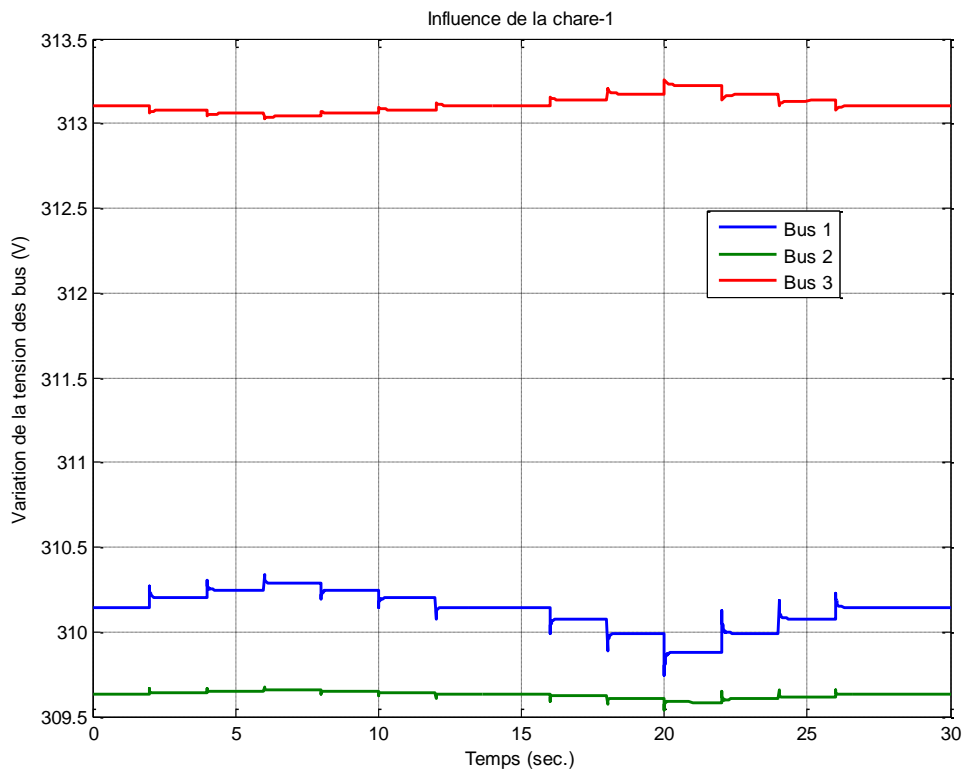


Figure IV.28. Influence de multi charges sur la tension.



## Interprétation

- **La figure IV. 24**, montre la variation de la fréquence en fonction du temps.

La figure nous montre une stabilité de la fréquence au début à  $T=0s$  jusqu'à  $T=2s$  à la valeur de 49,99758Hz, après on remarque une instabilité qui dure longtemps de  $T=2s$  à  $T=27s$ , avec plusieurs pics qui sont enregistrés, on voit bien un pic maximal à  $T=6s$  qui atteint la valeur de 49,99778 HZ, et un autre minimal à  $T=20s$  avec la valeur de 49,9971Hz, pour qu'elle stabilise au final à  $T=28s$  à la valeur de 49,99758 HZ.

- **La figure IV. 25**, montre la variation du courant des lignes en fonction du temps.

D'après la figure, on voit une stabilité au début des deux lignes de  $T=0s$  à  $T=2s$  à 1,8A pour la ligne (1-2) et 8,7 A pour la ligne (2-3). Après, on observe une instabilité pour les deux cas.

Pour la première ligne, on remarque plusieurs pics qui sont enregistrés pendant tout le temps.

Le pic maximal est à l'instant  $T=6s$  avec une valeur de 2,1A après il stabilise à  $T=26s$  à la valeur de 2,9 A.

Pour la deuxième ligne, on voit aussi instabilité avec plusieurs pics.

Le pic maximal est à l'instant  $T=20s$ , avec une valeur de 9,2 A après il stabilise encore une fois à  $T= 26,1s$  à 8,8A.

- **La figure IV. 26**, montre la variation des trois charges en fonction du temps.

La figure nous montre, une stabilité de la première charge de  $T=0s$  à  $T=1,5s$  à la valeur de 9,3A après on voit bien une instabilité avec plusieurs pics.

Le pic maximal est marqué à l'instant  $T=20s$  à la valeur de 14,1A après il stabilise encore une fois à  $T=26,1 s$  à 9,4A.

Pour les deux charges, on voit qu'elles restent stables à 9,4A pour la deuxième charge, et 9,47A pour la troisième charge, et elles ne subissent aucune instabilité.

- **La figure IV.27**, montre la variation du courant des convertisseurs (1 et 2) en fonction du temps.

La figure nous montre une stabilité des deux convertisseurs de  $T=0s$  à  $T=2s$  à 10,6A pour le premier convertisseur et 18,15A pour le deuxième convertisseur, après on voit une instabilité dans les deux cas.

Pour le premier convertisseur, on remarque une instabilité avec des pics différents.

Le pic maximal est à l’instant  $T=20s$ , avec la valeur de  $14,4A$  puis il stabilise à la valeur de  $12,4 A$  à  $T= 26,1s$  juste avant d’un pic qui est marqué à  $T=26s$ .

Pour le deuxième convertisseur, on voit aussi une instabilité avec plusieurs pics.

Le pic maximal est enregistré à  $T=20s$  à la valeur  $18,6 A$ , après on remarque qu’il stabilise à  $26,1s$  à une valeur de  $18,1A$ .

➤ **La figure IV. 28**, montre la variation de la tension des trois bus en fonction du temps.

On remarque, une stabilité des trois tensions au début de  $T=0s$  à  $T=2s$  à :

$310,2 v$  pour la première tension.

$309,15v$  pour la deuxième tension.

$313,15v$  pour la troisième tension.

Après on voit bien des différents et plusieurs pics pour les trois tensions.

Pour la première tension, on observe un pic maximal à  $T=6s$  avec une valeur de  $310,35v$ , et un pic minimal à  $T=20s$  avec une valeur de  $309,7v$ , après elle stabilise à  $T=26s$  à la valeur de  $310,15v$ .

Pour la deuxième tension, on observe aussi plusieurs pics, et elle stabilise enfin à  $T=26s$  à  $309,6v$ .

Pour la troisième tension, on voit des pics.

Le pic maximal est marqué à l’instant  $T=20s$  à une valeur de  $313,3v$  après elle stabilise à  $T=26s$  à  $313,1v$ .

|       |                |        |          |
|-------|----------------|--------|----------|
| F     | 49.99758 HZ    | Ich3   | 9.47 A   |
| W     | 313.98480rad\s | Iconv1 | 12.4 A   |
| IL1-2 | 2.9 A          | Iconv2 | 18,1 A   |
| IL2-3 | 8.8 A          | Vb1    | 310.15 V |
| Ich1  | 9.4 A          | Vb2    | 309.6 V  |
| Ich2  | 9.47 A         | Vb3    | 313.1 V  |

Tableau. IV.6. Les valeurs finales des différents paramètres obtenus lors de la variation multi charges.

## **Conclusion**

La modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink d'un micro-réseau électrique alimenté en courant alternatif a fait l'objet de ce chapitre. Le micro-réseau est composé de deux DG, deux lignes et trois charges.

Pour étudier la stabilité du système, différents scénarios de perturbations ont été étudiés. Une interprétation des résultats est donnée pour montrer l'influence de certains paramètres de réglage qui ont un effet sur la stabilité du système. Ces paramètres sont le gain de statisme des puissances active et réactive ( $M_P$  et  $M_Q$ ). L'influence de la variation de la charge a été aussi prise en considération.

**Conclusion générale :**

Aujourd'hui, l'électricité est indispensable à notre vie quotidienne. Les types de sa production se diffèrent comme ceux de ses méthodes de sa consommation, et avec le développement de la technologie et les besoins de la vie, les recherches et les expériences scientifiques liées à l'électricité se sont développées avec elle pour atteindre les meilleures conditions de son utilisation.

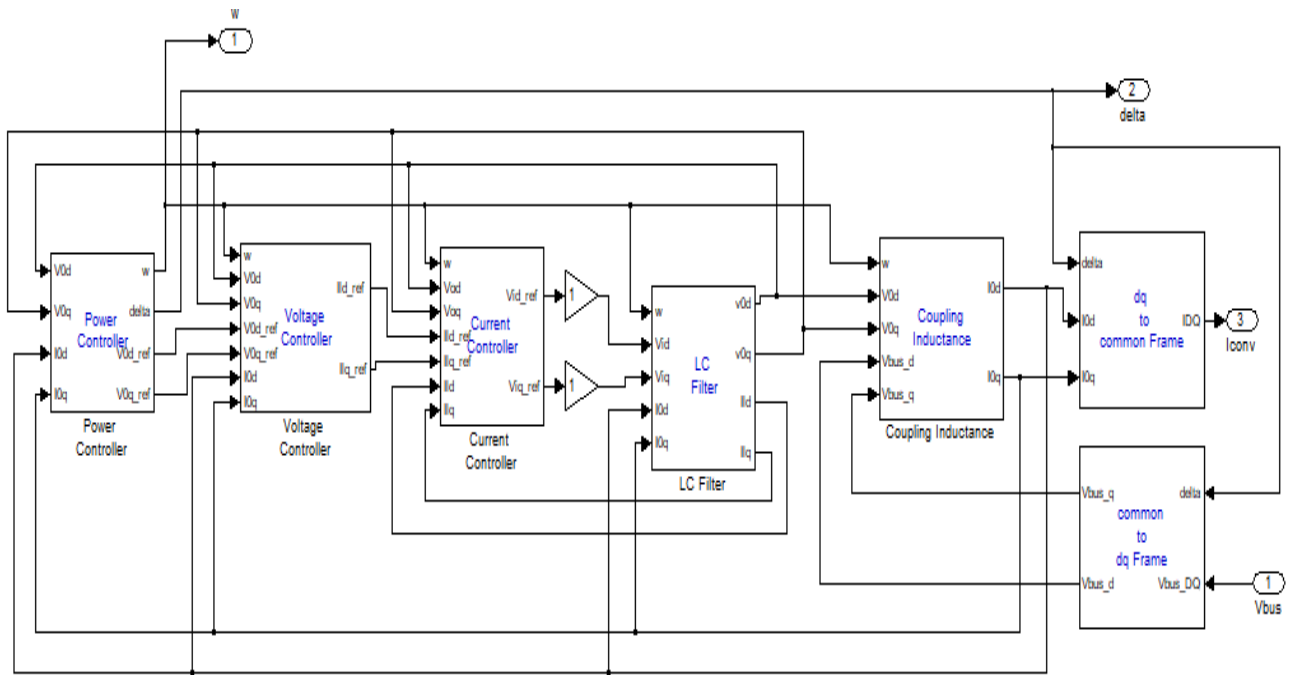
Un réseau électrique englobe les lignes et les postes électriques, ainsi que les transformateurs, déployer une stratégie de contrôle globale sur les réseaux électriques actuels s'avère un véritable défi, une solution serait de décomposer le réseau en sous ensemble interconnectés, appelés les micro-réseaux.

Un micro-réseau est un type de technologie qui a la capacité de développer et d'augmenter le meilleur fonctionnement du système.

Un micro-réseau est un système interconnecté de charges et de production locale qui peut fonctionner indépendamment du réseau électrique (en îlot) ou qui lui est attaché (en réseau).

Le présent mémoire de fin d'études, nous a permis d'aborder la stabilité du micro-réseau alimenté par un courant alternatif, le travail effectué a été subdivisé en quatre chapitres.

# Annexe



Zoom de convertisseur

## Bibliographie :

- [1] EMMANUEL. De Jaeger. « *Electric Energy Systems* ». Mémoire de fin d'études, Université Catholique de Louvain | Ecole polytechnique de Louvain, 2017.
- [2] [https://www.hevs.ch/media/document/1/1\\_afterworkenergy\\_20161110\\_dominiqueroggo\\_partners.pdf](https://www.hevs.ch/media/document/1/1_afterworkenergy_20161110_dominiqueroggo_partners.pdf). Consulté le 01-05-2022
- [3] : JEAN DOBROWOLSKI, « Modélisation, contrôle/commande et certification d'un micro réseau électrique décentralisé avec entrées exogènes aléatoires et informations Contraintes. Énergie électrique », thèse doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017. Français.
- [4] : B. SARAM.FARIDA, « Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid », Mémoire de fin d'études, Soutenu publiquement le 12/06/2016.
- [5] : TOMMY ANDY, THEUBOU TAMEGHE Ph. D. « contribution à la mise en œuvre et à la commande de micro réseau de cogénération modulaire (injection de puissance et stabilisation de fréquence) », thèse de doctorat, université du QUÉBEC (Université du Québec à Chicoutimi), Décembre 2019.
- [6] S.Sakkas. « *Control of a DC Microgrid*. Université de technologie de Delft (Delft University of Technology (TU Delft)) », Mémoire de fin d'études, nov. 2018.
- [7] Jackson Justo, Francis Mwasilu, Ju Lee, and Jin-Woo Jung. Ac-microgrids Versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 24:387–405, 08 2013
- [8] <https://www.elia.be/fr/projets/projets-reseau/alegro/alegro-content>, Consulté le 2/05/2022.
- [9] <https://www.encyclopedie-energie.org/en/home/> Consulté le 06\05\2022.
- [10] AURELIE CHABAUD, « Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources Énergétiques », thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Perpignan Via Domitia, 2014.
- [11] thèse pour obtenir le grade du docteur de la communauté université Grenoble Alpes spécialité automatique productique présenté par Jean Dobrowolski sous le titre de « modeling contrôle and certification of an electrical decentralized microgrid with random exogenous inputs and constained information » thèse de soutenue publiquement le 21 décembre 2017.
- [12] Q. Yao, D.G. Holmes, "A Simple, Novel Method for Variable- Hysteresis-Band Current Control of A Three Phase Inverter with Constant Switching Frequency". IEEE, IAS 93 Ann.Meet ConfRec, Toronto, October 1993, pp. 1122-1129.
- [13] Z. X. Xiao, C. S. Wang, and S. X. Wang, "Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources," *Autom. Elect. PowerSyst.*, vol. 33, no. 6, pp. 81–85, 2009.

- [14] analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model Kai Yu, Qian Ai, *Member, IEEE*, Shiyi Wang, Jianmo Ni, and Tianguang Lv
- [15] N. Kroutikova, C. Hernandez-Aramburo, and T. Green, « State space model of voltage controlled inverters for distributed energy sources », Companion paper under review, 2006.
- [16] “Distributed generation technical interconnection requirements: Interconnections at voltages 50kV and below,” Hydro One Networks Inc. Toronto, Ontario, Tech. Rep. DT-10-015 R3, Mar. 2013.
- [17] J. Wang, H. Zhang, and Y. Zhou, “Intelligent under frequency and under voltage load shedding method based on the active participation of smart appliances,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 353–361, Jan. 2017.
- [18] C. W. Taylor, “Concepts of under voltage load shedding for voltage stability,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 2, pp. 480–488, Apr. 1992.
- [19] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Cañizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, and V. Vital, “Definition and classification of power system stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, May 2004.
- [20] A. Bernstein, J. L. Boudec, L. Reyes-Chamorro, and M. Paolone, “Realtime control of microgrids with explicit power setpoints: Unintentional islanding,” in *Proc. IEEE PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, July 2015, pp. 1–6.
- [21] G. Dellile, B. Francois, and G. Malarange, “Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system’s inertia,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 931–939, Oct. 2012.
- [22] A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, G. Ciappi, and A. Solari, “Synchronized phasors monitoring during the islanded maneuver of an active distribution network,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 82–91, Mar. 2011.
- [23] A. H. Hajimiragha, M. R. Dadash Zadeh, and S. Moazeni, “Microgrids frequency control considerations within the framework of the optimal generation scheduling problem,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 534–547, Mar. 2015.
- [24] IEEE Standard for the specification of microgrid controllers, IEEE Std. 2030.7, 2018
- [25] K. Strunz, E. Abbasi, C. Abbey, C. Andrieu, U. Annakkage, S. Barsali, R. C. Campbell, R. Fletcher, F. Gao, T. Gaunt, A. Gole, N. Hatziargyriou, R. Iravani, G. Joos, H. Konishi, M. Kuschke, E. Lakervi, C. Liu, J. Mahseredjian, F. Mosallat, D. Muthumuni, A. Orths, S. Papathanassiou, K. Rudion, Z. Styczynski, and S. C. Verma, “Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources,” *CIGRE*, Paris, France, Tech. Rep. C6.04.02, Apr. 2014.

- [26] M. Farrokhbabadi, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Frequency control in isolated/islanded microgrids through voltage regulation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 3, pp. 1185–1194, Oct. 2015.
- [27] R. Prada and L. Souza, "Voltage stability and thermal limit: constraints on the maximum loading of electrical energy distribution feeders," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 5, pp. 573–577, Sep. 1998.
- [28]. A. Kazemi, and B. Badrzadeh, " Modeling and Simulation of SVC and TCSC totudy their Limits on Maximum Load ability Point," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, pp.619-626, Apr. 2004.
- [29] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, "Modeling and analysis of harmonic stability in an ac power-electronic-based power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6421–6432, Dec. 2014.
- [30] X. Wang, F. Blaabjerg, and Z. Chen, "Autonomous control of inverter interfaced distributed generation units for harmonic current filtering and resonance damping in an islanded microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 1, pp. 452–461, Jan. 2014
- [31] A. Bidram and A. Davoudi, "Hierarchical structure of microgrids control system," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, Dec. 2012.
- [32] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 797–807, Jun. 2012.
- [33] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids\_A general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Aug. 2011.
- [34] T. L. Vandoorn, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, and L. Vandeveldel, "Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 613–628, Mar. 2013.
- [35] X. Sun, Y.-S. Lee, and D. Xu, "Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average current-sharing scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 844–856, May 2003.
- [36] H. Xin, L. Zhang, Z. Wang, D. Gan, and K. P. Wong, "Control of island AC microgrids using a fully distributed approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 943–945, Mar. 2015.
- [37] T. Kawabata and S. Higashino, "Parallel operation of voltage source inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no. 2, pp. 281–287, Mar. 1988.
- [38] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 797–813, Apr. 2015.



