

Réseaux électriques en présence de génération d'énergies distribuée

Youssef Hennane

▶ **To cite this version:**

Youssef Hennane. Réseaux électriques en présence de génération d'énergies distribuée. Energie électrique. Université de Lorraine; Université Hassan II (Casablanca, Maroc), 2022. Français. NNT : 2022LORR0183 . tel-04015811

HAL Id: tel-04015811
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04015811

Submitted on 6 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

UNIVERSITÉ HASSAN II

THÈSE

Présentée à
L'UNIVERSITÉ HASSAN II
En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE
Spécialité : Energie et mécanique
ET
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE HASSAN II
Spécialité : Génie électrique
Par

Youssef HENNANE

Electrical networks in the presence of distributed energy generation

Réseaux électriques en présence de génération d'énergies distribuée

Soutenue publiquement le 30/11/2022 devant un jury composé de :

M. Mohamed MACHMOUM, Professeur à l'Université de Nantes	**Rapporteur**
M. Ahmed ESSADKI, Professeur de l'Enseignement Supérieur, Université Mohammed V de Rabat	**Rapporteur**
M. Jamal BOUKHEROUAA, Professeur de l'Enseignement Supérieur, Université Hassan II de Casablanca	**Président**
M. Abdelmajid ABOULOIFA, Professeur Habilité (PH), Université Hassan II de Casablanca	**Examinateur**
Mme. Valérie LOUIS DORR, Professeur à l'Université de Lorraine	**Examinatrice**
M. Farid MEIBODY-TABAR, Professeur à l'Université de lorraine	**Directeur de thèse**
M. Abdelmajid BERDAI, Professeur de l'Enseignement Supérieur, Université Hassan II de Casablanca	**Directeur de thèse**
M. Serge PIERFEDERICI, Professeur à l'Université de lorraine	**Co-directeur de thèse**

Remerciements

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés à L'ED SIMPPÉ au laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Université de Lorraine, Nancy-France et au laboratoire Energie et Systèmes Electriques, ENSEM Casablanca, Université Hassan II de Casablanca, Maroc. Des remerciements sont adressés à ces instituts, ainsi qu'au programme PHC Toubkal pour leur soutien financier pendant les quatre années d'études de doctorat.

Ce projet a été réalisé sous la supervision du Professeur Farid MEIBODY-TABAR, du Professeur Abdelmajid BERDAI et du Professeur Serge PIERFEDERICI. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes superviseurs, pour leurs conseils professionnels et constructifs, leur inspiration et leur confiance. C'est un grand honneur pour moi de travailler avec eux et je crois que leur éthique et leur dévouement au travail m'encourageront constamment dans ma vie future.

J'ai également l'honneur et le plaisir de remercier tous les membres du jury :

- M. Jamal BOUKHEROUAA, Professeur à l'Université HASSAN II, pour avoir présidé ce jury et accepté d'être l'un de mes examinateurs. J'ai beaucoup apprécié son grand intérêt pour notre travail, ainsi que la pertinence de ses questions le jour de la soutenance.

- M. Ahmed ESSADKI, Professeur de l'Enseignement Supérieur, Université Mohammed V de Rabat, pour avoir accepté d'être l'un de mes rapporteurs. J'apprécie beaucoup le grand intérêt qu'il porte à nos travaux.

- M. Mohamed MACHMOUM, Professeur à l'Université de Nantes, pour avoir accepté la lourde tâche de rapporteur. J'ai beaucoup apprécié ses remarques très constructives lors de la soutenance ainsi que ses vastes connaissances dans ce domaine.

- M. Abdelmajid ABOULOIFA, Professeur Habilité (PH), Université Hassan II de Casablanca, pour avoir participé à ce jury en tant qu'examinateur. J'ai beaucoup apprécié son regard sur notre travail et ses précieuses remarques.

- Mme Valérie LOUIS DORR, Professeur à l'Université de lorraine, pour avoir participé à ce jury en tant qu'examinatrice. J'ai beaucoup apprécié l'intérêt qu'elle a porté à notre travail.

Je tiens à remercier le personnel, les chercheurs, les secrétaires et les techniciens du LEMTA pour leur amitié. Je tiens également à remercier mes chers amis qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de ces quatre années. J'adresse une immense gratitude à mon père Ahmed HENNANE pour son amour exceptionnel et ses encouragements.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à celle qui me manque vraiment : Ma mère Yamina LAAGUER. Ma mère est la plus grande raison qui a éclairé mon chemin et m'a conduit jusqu'ici. Malheureusement, après m'avoir conduit jusqu'ici, elle a changé de chemin et est partie. Par malheur, je n'ai pas eu l'occasion de la remercier ni d'exprimer ma gratitude envers elle. Je voudrais dédier mon travail à son âme en lui souhaitant de reposer en paix.

Thèse réalisée en cotutelle à :

- L'École doctorale Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie (SIMPPÉ), laboratoire LEMTA, 2 avenue de la Forêt de Haye BP 90161 54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, lemta-contact@univ-lorraine.fr, Web http://doctorat.univ-lorraine.fr/fr/les-ecoles-doctorales/simppe/presentation

- Énergie et systèmes électriques, Laboratoire de l'Ecole Nationale supérieure d'Electricité et de mécanique, ENSEM, Université Hassan II de Casablanca, Boulevard Abdellah Ibrahim (Ex. Route d'El Jadida), Casablanca, Maroc, contact@ensem.ac.ma, Web ensem.ac.ma

Sous la direction de :

Farid meibody-tabar farid.meibody-tabar@univ-lorraine.fr

Abdelmajid Berdai a.berdai@gmail.com

Serge Pierfederici serge.pierfederici@univ-lorraine.fr

Financement : Ce projet a été soutenu financièrement par le Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et l'Institut français de Rabat (PHC TOUBKAL 2019 (programme bilatéral franco-marocain) Numéro de subvention : 12345AB).

Contenu

Liste des figures 9

Liste des tables 16

Introduction générale 18

Etat de l'art 22

1.1. Micro-réseaux 23

1.2. Contrôle des micro-réseaux 25

1.3. Contrôle local d'un générateur distribué (DG) 28

1.3.1. Contrôle primaire d'un DG 29

1.3.1.1. Contrôleur interne du contrôle primaire d'un DG 29

1.3.1.2. Contrôleur de puissance ou externe 31

1.3.1.2.1. Méthodes de contrôle décentralisées pour le réglage primaire 35

1.3.1.2.2. Méthodes de contrôle centralisées pour le réglage primaire 36

1.3.1.2.3. Méthodes de contrôle distribuées pour le réglage primaire 36

1.3.2. Le contrôle secondaire 37

1.3.2.1. Méthodes de contrôle décentralisées pour le réglage secondaire 39

1.3.2.2. Méthodes de contrôle centralisées pour le réglage secondaire 39

1.3.2.3. Méthodes de contrôle distribuées pour le réglage secondaire 40

1.4. Conclusion 41

Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation 43

2.1. Introduction 44

2.2. Stratégies de contrôle de micro-réseaux maillés îlotés 47

2.2.1. Equirépartition des puissances à l'aide du contrôle Droop 47

2.2.2. Stratégie de synchronisation dans un micro-réseau maillé îloté. 53

2.2.3. Première validation par simulation des stratégies de commande non-linéaire proposée dans les micro-réseaux maillés îlotés. 54

2.2.4. Validation des stratégies de contrôle proposées dans les micro-réseaux maillés îlotés à l'aide des tests HIL 60

2.2.5. Impact des délais de communication sur la stabilité du micro-réseau. 62

2.3. Modélisation du système pour son analyse de stabilité 65

2.3.1. Modèle espace-état d'un générateur distribué (DG) 65

2.3.2. Structure et modélisation du micro-réseau 66

2.3.3. Validation du modèle d'état 69

2.4. Etude de la stabilité du micro-réseau maillé basée sur son modèle d'état 70

2.4.1. Analyse des trajectoires des valeurs propres et l'étude de leurs sensibilités pour différentes valeurs des paramètres des lignes électriques 72

2.4.2. Analyse des trajectoires des valeurs propres et l'étude de leurs sensibilités pour différentes valeurs des paramètres des DGs 73

2.4.3. Analyse de la trajectoire des valeurs propres et de la sensibilité pour différentes valeurs des paramètres de charge 79

2.4.4. Stabilité du micro-réseau maillé et robustesse de son contrôle en présence des charges à puissance constante (CPL) 81

2.4.5. Modèle de CPL 82

2.4.6. Analyse de la trajectoire des valeurs propres et de la sensibilité pour différentes valeurs de CPL 83

2.4.7. Amélioration de la stabilité 84

2.5. Synchronisation et partage des puissances dans les micro-réseaux maillés en mode connecté au réseau. 85

2.5.1. Résultats de simulation dans les micro-réseaux maillés en mode connecté au réseau. .. 85

2.5.2. Validation de la commande Droop non-linéaire des DGs du micro-réseau connecté au réseau par la simulation temps réel Hardware-In-the-Loop. 87

2.5.3. Étude de robustesse du contrôle du micro-réseau maillé dans les modes de fonctionnement îloté et connecté au réseau. 87

2.6. Conclusion 89

Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés. 92

Sommaire

3.1. Introduction 93
3.2. Contrôle primaire distribué 95
3.2.1. Partage de la puissance à l'aide de stratégies de commande Droop 95
3.2.2. Stratégie de commande Droop basée sur le consensus pour le partage de la puissance 96
3.2.3. Résultats des simulations 99
3.2.4. Robustesse du contrôle primaire 101
3.2.5. Validation à l'aide de simulations en temps réel Hardware In the Loop 101
3.2.6. Effets du contrôle primaire sur la fréquence et l'amplitude de la tension du micro-réseau 102
3.3. Contrôle secondaire distribué 103
3.3.1. Régulation de fréquence distribuée et partage de la puissance active 104
3.3.2. Régulation de tension distribuée et partage de la puissance réactive 107
3.3.3. Robustesse du contrôle secondaire de la fréquence et de la tension 110
3.4. Impact des délais de communication sur la stabilité du micro-réseau 113
3.5. Modélisation du système pour son analyse de stabilité 116
3.5.2. Stabilité du micro-réseau maillé et analyse de robustesse de son contrôle primaire avec consensus 118
3.5.2.1. Valeurs propres de la matrice jacobienne 118
3.5.2.2. Influence des paramètres des lignes électriques sur la stabilité du micro-réseau . 120
3.5.2.3. Influence des paramètres de contrôle sur la stabilité du micro-réseau 121
3.5.2.4. Influence des variations de charges sur la stabilité du micro-réseau 127
3.5.3. Analyse de la stabilité du contrôle secondaire 129
3.5.3.1. Modélisation du système pour son analyse de stabilité 129
3.6. Conclusion 130
Conclusion générale 133
Liste des publications 137
Publications dans des journaux internationaux à comité de lecture : 138
Communications, participation congrès, colloques, séminaires : 138
Bibliographie 141

Sommaire

Abstract: 151

Résumé : 152

Sommaire

Liste des figures

Fig.1.1 Micro-réseau 25
Fig.1.2 Micro-réseau maillé..... 25
Fig.1.3 Stratégie de contrôle hiérarchique des micro-réseaux..... 27
Fig.1.4 Contrôle décentralisé (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur)..... 27
Fig.1.5 Contrôle centralisé (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur) 28
Fig.1.6 Contrôle distribué (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur) 28
Fig.1.7 Schéma bloc de commande du convertisseur interfacé. 29
Fig.1.8 Diagramme fonctionnel du contrôle hiérarchique..... 31
Fig.1.9 Générateur distribué Délivrant la puissance au bus infini par l'impédance Zi [31] 31
Fig.1.10 Pour une impédance purement résistive [31]..... 32
Fig.1.11 Pour une impédance purement inductive [31] 33
Fig.1.12 Caractéristiques générales du Droop control pour des lignes inductives..... 34
Fig.1.13 Architecture centralisée du contrôle secondaire 38
Fig.1.14 Architecture distribuée du contrôle secondaire 38
Fig.1.15 Architecture décentralisée du contrôle secondaire..... 39

Fig.2.1 (a) : Micro-réseau mono PCC. (b): Micro-réseau maillé..... 46
Fig.2.2 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DGs (tiré de [97]) 48
Fig.2.4 Modèle simplifié du micro-réseau 51
Fig.2.7 Micro-réseau maillé pour simulation 55
Fig.2.8 Source de tension contrôlable 56
Fig.2.9 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DG à commande droop dans Simscape... 56
Fig.2.10 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le
Fig.2.11 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le
Fig.2.12 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le
Fig.2.13 Micro-réseau maillé 3-DGs îloté..... 59

Fig.2.14 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 5 s, le deuxième DG est connecté au micro-réseau à 5 s, le troisième DG est connecté au micro-réseau à 15 s). 59

Fig.2.15 Plate-forme expérimentale du système de simulation HIL proposé..... 61

Fig.2.16 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (HIL)..... 61

Fig.2.17 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (changement de topologie HIL). 61

Fig.2.18 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (variation de charge HIL). 62

Fig.2.19 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DG à commande droop dans Simscape63

Fig.2.20 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 100 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s). 64

Fig.2.21 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 300 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s). 64

Fig.2.22 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 600 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s). 64

Fig.2.23 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 1.7 s (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s)..... 65

Fig.2.24 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DGi contrôlé par droop..... 65

Fig.2.25 Micro-réseau maillé ilote. 66

Fig.2.26 Cadres de référence α-β et d-q 67

Fig.2.27 Résultats de la simulation obtenus à l'aide de Simscape et du modèle d'état mathématique. Les deux DG ont été connectés au micro-réseau à t= 0s et la commande non linéaire est appliquée à t = 2s. (a) Evolution des puissances actives des DG par unité. (b) Evolution des puissances réactives des DG par unité. (c) Zoom sur les puissances réactives par unité autour de 0s.69

Fig.2.28 Évolution des valeurs propres correspondant aux changements des paramètres des lignes. 72

Fig.2.29 Évolution des puissances active et réactive des DGs obtenue avec le modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s et à t = 5 s les valeurs des paramètres des lignes sont augmenté de 15%.) : (a) avec deux fois les valeurs initiales des paramètres des ignes. (b) avec les valeurs initiales des paramètres des lignes. 73

Fig.2.30 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de ωf (20<ωf<200(rad⁄s) avec ωf croissant)..... 74

Fig.2.31 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle (les deux DG sont connectés à 0 s et à t = 5 s la valeur de ωf augmenté de 15%) : (a) avec ωf=200rad/s. (b) avec ωf=20rad/s..... 74

Fig.2.32 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de ωc (50<ωc<1000 (rad/s) avec ωc décroissant). 75

Liste des figures

Fig.2.33 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s)) : avec ωc=50 rad/s. 75

Fig.2.34 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s)) : avec ωc=45 rad/s. 76

Fig.2.35 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de $\Delta\omega$ (0,5 < $\Delta\omega$ < 15 (rad/s)) avec $\Delta\omega$ croissant. 76

Fig.2.36 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : Δω = 12,5 rad/s 77

Fig.2.37 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : Δω = 15 rad/s 77

Fig.2.38 Évolution des valeurs propres avec la modification de la chute de tension 6 < ΔE < 60 (V) avec ΔE croissant. 78

Fig.2.39 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DGs connectés à 0 s) : ΔE = 28 V 78

Fig.2.40 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : ΔE = 30 V 79

Fig.2.41 Évolution des pôles basse fréquence du modèle complet en fonction des paramètres de commande Ki du contrôleur non linéaire. (Pour Ki=0.0033 à Ki=0.033). 79

Fig.2.42 Evolution des valeurs propres correspondant à la diminution de RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant. 80

Fig.2.43 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les deux DG connectés à 0 s avec 2/3 de la charge totale). 81

Fig.2.44 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les deux DG connectés à 0 s avec 4/3 de la charge totale et à t = 5 s les valeurs des charges sont baissé de 15%). 81

Fig.2.45 Evolution de la puissance active des DG sous différents états de charge (les deux DG connectés à 0 s) 82

Fig.2.46 Micro-réseau maillé ilote Avec CPL. 82

Fig.2.47 Evolution des valeurs propres correspondant à l'augmentation de Pc (1 < Pc < 10 (kW) avec $Qc = 0\ VAr$). 83

Fig.2.48 Évolution des puissances actives (a) Pc = 4 kW. (b) Pc = 5 kW. (Les deux DG connectés à 0 s et la CPL est connecté t = 5s) 84

Fig.2.49 Évolution de la puissance active des DG : (a) Pc = 7 kW. (b) Pc = 8 kW. (Les deux DG connectés à 0 s et la CPL est connecté t = 5s) avec C3=500 nF 84

Fig.2.50 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DGs (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 20 s). (Simscape) 86

Fig.2.51 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal. (Smscape) 86

Liste des figures

Fig.2.52 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 20 s). (HIL) 87

Fig.2.53 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal. (HIL) 87

Fig.2.54 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG sous plusieurs tests de robustesse (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 5 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 5 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 15 s). (HIL) 88

Fig.2.55 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal sous plusieurs tests de robustesse. (HIL) 89

Fig.3.1 Micro-réseau maillé 95

Fig.3.2 Contrôle du micro-réseau 96

Fig.3.3 Graphe du réseau de communication 97

Fig.3.5 Évolution des potentiels de référence (a), puissances actives (b) et réactives (c) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s) 101

Fig.3.6 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de type droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s) 101

Fig.3.7 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de type droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s). Bleu DG1, vert DG2 et rouge DG3 102

Fig.3.8 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s). Bleu DG1, vert DG2 et rouge DG3 102

Fig.3.9 Evolution de la tension des DG (a) et de la fréquence (b). (Le contrôle non linéaire est appliqué à 10s). 103

Fig.3.10 Evolution de la tension du DG1 (a) et de la fréquence (b). (Le contrôle non linéaire est appliqué à 10s). 103

Fig.3.11 Evolution des fréquences des DG (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 105

Fig.3.12 Evolution des fréquences des DG (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 105

Fig.3.13 Évolution des puissances actives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape) (le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s). 106

Fig.3.14 Évolution des puissances actives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL) (le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s). 106

Fig.3.15 Evolution des Xvi (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 109

Fig.3.16 Evolution des tensions des DG (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 109

Fig.3.17 Evolution de la tension du DG1 (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 109

Fig.3.18 Évolution des puissances réactives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 110

Fig.3.19 Évolution des puissances réactives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 110

Fig.3.20 Evolution des tensions (a) et des fréquences (b) des DG (Simscape) sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 111

Fig.3.21 Evolution des tensions (a) et des fréquences (b) des DG (HIL) sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 112

Fig.3.22 Évolution de la puissance active (a) et de la puissance réactive (b) des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape) et sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 112

Fig.3.23 Évolution de la puissance active (a) et de la puissance réactive (b) des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL) et sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s) 112

Fig.3.24 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 40 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 114

Fig.3.25 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 40 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s). 114

Fig.3.26 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 80 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 115

Fig.3.27 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 80 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s). 115

Fig.3.28 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 110 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)..... 116

Fig.3.29 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 110 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s). 116

Fig.3.30 Micro-réseau maillé ilote pour la modélisation 117

Fig.3.31 Résultats de la simulation obtenus à l'aide de Simscape et du modèle d'état mathématique. Les 3 DG sont connectés au micro-réseau à t= 0s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s. (a) Evolution des puissances actives des DG. (b) Evolution des puissances réactives des DG par unité. (c) Zoom sur les puissances réactives par unité autour de 5s..... 118

Fig.3.32 (a) Valeurs propres dans les conditions de fonctionnement nominales. (b) Zoom sur les valeurs propres basse fréquence. 119

Fig.3.33 Évolution des valeurs propres sensibles aux changements des paramètres des lignes . 120

Fig.3.34 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec deux fois les valeurs initiales des paramètres des lignes. 121

Fig.3.35 Évolution des valeurs propres sensible lors de la variation de ωf (20<ωf<200(rad⁄s) avec ωf croissant). 122

Fig.3.36 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωf = 200 rad/s. 123

Fig.3.37 Évolution des valeurs propres sensibles à la variation de ωc (20<ωc<1000 (rad/s) avec ωc décroissant). 123

Fig.3.38 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωc = 20 rad/s..... 124

Fig.3.39 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωc = 15 rad/s..... 124

Fig.3.40 Évolution des valeurs propres sensibles à la variation de $\Delta\omega$ (0,5 < $\Delta\omega$ < 10 (rad/s)) avec $\Delta\omega$ croissant. 125

Fig.3.41 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : Δω = 9,5 rad/s 125

Fig.3.42 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : Δω = 10 rad/s 126

Fig.3.43 Évolution des valeurs propres avec la modification de la chute de tension 6 < ΔE < 30 (V) avec ΔE croissant. 126

Fig.3.44 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : ΔE = 23 V 127

Fig.3.45 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : ΔE = 25 rad/s 127

Fig.3.46 Evolution des valeurs propres correspondant à la diminution de RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant. 128

Fig.3.47 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les 3 DG connectés à 0 s avec 1/2 de la charge totale et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)..... 129

Fig.3.48 Évolution des valeurs propres sensibles aux changements des paramètres des lignes . 129

Fig.3.49 (a) Évolution des pôles obtenus à l'aide du modèle simplifié en fonction des paramètres de commande Kpv Kiv du réglage secondaire de tension. (b) Évolution des pôles basse fréquence du modèle complet en fonction des paramètres de commande Kpv Kiv. 130

Liste des figures

Liste des tables

Table 2.1 Paramètres des lignes électriques du micro-réseau considéré..... 45

Table 2.2 Puissances des sources et des charges..... 45

Table 2.3 Paramètres des charges électriques du micro-réseau considéré 70

Table 2.4 Paramètres des DG considérés..... 70

Table 2.5 Valeurs propres dans les conditions de fonctionnement nominales..... 71

Table 3.1 Paramètres des lignes de transport du micro-réseau considéré 99

Table 3.2 Puissances des sources et des charges..... 100

Table 3.3 Paramètres de DG3 119

Table 3.4 Étude comparative entre les contrôles proposés pour le partage du pouvoir dans les chapitres 2 et 3..... 131

Liste des tables

Introduction générale

Introduction générale

En raison de l'utilisation massive de ressources fossiles et face à l'augmentation de la demande énergétique, l'utilisation des systèmes d'énergie électrique classiques a des effets négatifs à la fois sur le plan écologique et sur le plan économique. Par conséquent, l'intérêt pour les systèmes locaux de production d'énergie utilisant des sources renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, est en forte croissance. Ce concept de production locale d'énergie électrique, également appelé production décentralisée, est la base des micro-réseaux qui sont en réalité des réseaux locaux à sources distribuées ("DG" pour "Distributed generator") souvent commandables par l'intermédiaire des convertisseurs statiques. En général, un micro-réseau est un regroupement de plusieurs unités de production distribuées et de systèmes de stockage interconnectés par des lignes électriques alimentant les différentes charges qui y sont connectées. Ces micro-réseaux ont des avantages économiques et écologiques dans certains cas qui peuvent fonctionner d'une manière îlotée ou connectée au réseau principal. Les micro-réseaux jouent un rôle important dans l'électrification des zones rurales et éloignés car ils peuvent fonctionner en mode îloté sans être dépendants du réseau principal, ce qui favorise l'accès à l'électricité de ces zones et peut dans certain cas éviter le coût d'installation de nouvelles longues lignes de transport d'énergie. Dans le mode de fonctionnement îloté des micro-réseaux et en raison de la nature intermittente des sources d'énergie renouvelables, la fiabilité de fourniture d'électricité aux différentes charges peut être un problème. Ce problème est plus sévère dans les micro-réseaux à topologies simples, dans lesquels les sources et les charges sont connectés par des lignes électriques à un seul point commun de connexion (micro-réseaux mono-PCC). Une solution efficace pour assurer une plus grande disponibilité de l'énergie pour les charges est la mise en place des micro-réseaux de topologies plus évoluées à structure maillée avec plusieurs sources distribuées de natures différentes. En général, les problèmes de stabilité, de gestion de l'énergie, de partage de la puissance consommée entre les sources distribuées (DGs), de régulation de la tension et de la fréquence, etc… sont plus critiques pour les micro-réseaux îlotés. Mais dans les micro-réseaux maillés, ces problèmes sont plus difficiles à résoudre en raison de leurs topologies complexes et reconfigurables.

Les travaux de recherche menés sont effectués dans le cadre d'une convention cotutelle entre l'Université de Lorraine en France et l'université Hassan II au Maroc. L'objectif de ces travaux est le contrôle des systèmes de génération distribuée dans les micro-réseaux maillés alternatifs isolés ou connectés au réseau. Ces travaux, réalisés au "Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée " (LEMTA) à Nancy et au laboratoire énergies et systèmes électriques (LESE) à Casablanca, sont synthétisés dans le présent manuscrit comportant trois chapitres dont les contenus sont présentés ci-après.

Le premier chapitre présente d'abord un état de l'art sur les micro-réseaux et une revue de plusieurs lois de contrôle basées sur des méthodes décentralisées, centralisées et distribuées pour les réglages primaire, secondaire et tertiaire de ces micro-réseaux. L'accent est mis sur La méthode du statisme ("Droop" selon la terminologie Anglo-Saxonne), pour le control de la puissance active en fonction de la fréquence (P-ω) et de la puissance réactive en fonction de la tension (Q-V), qui est chargée d'assurer un partage des puissances active et réactives consommées entre les différentes sources distribuées du micro-réseau en fonction de leurs puissances nominales ou disponible. A l'issu de cet état de l'art, nous montrons que la plupart des méthodes de contrôle existantes sont souvent plus efficaces dans le cas des de micro-réseaux mono-PCC (non maillés), ce qui permet de justifier les travaux développés aux chapitres suivants sur le contrôle et l'étude de la stabilité des micro-réseaux maillés.

Ainsi dans le deuxième chapitre, nous proposons une stratégie de contrôle de "Droop" non linéaire pour le partage précis des puissances active et réactive des DGs ainsi que leurs synchronisations au micro-réseau maillés considérés pour garantir la fonction " plug and play ". L'efficacité de la méthode proposée est prouvée par des simulations à l'aide de l'outil Simscape du logiciel Matlab puis validé par des tests de simulation en temps réel (hardware in the loop) à l'aide des outils fournis par Dspace et OPAL-RT. Pour étudier la stabilité d'un micro-réseau maillé à plusieurs DGs et la robustesse de

leurs contrôles distribués, un modèle d'état de l'ensemble est développé et validé en tenant compte de ses lignes électriques, ses charges ainsi que ses générateurs intégrant leurs contrôleurs.
Après l'étude complète du micro-réseau maillé considéré en mode îloté, dans la suite du 2ème chapitre nous présentons l'étude de son fonctionnement en mode connecté au réseau. La première partie de l'étude concerne la synchronisation du micro-réseau maillé et sa connexion sans à-coup en tant qu'unité au réseau principal sans affecter le partage des puissances active et réactive consommées entre ses différents DGs. Après connexion au réseau, les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont contrôlées indépendamment en ajoutant aux équations de "Droop" de chaque DG la sortie d'un contrôleur tertiaire centralisé, utilisant les informations sur le vecteur tension du nœud par lequel le micro-réseau est connecté au réseau principal, appelé le nœud pilote, et le vecteur courant échangé entre eux. La robustesse de cette stratégie de contrôle par rapport aux grandes variations des puissances des charges et aux modifications de la topologie du micro-réseau est également étudiée à la fin de ce chapitre.

Le point faible de la stratégie de contrôle de "Droop" non linéaire proposée pour assurer le contrôle des micro-réseaux maillés îlotés est sa dépendance à une information unique du nœud pilote pour assurer le partage précis des puissances entre les DGs même si le partage des puissances active reste précis. Pour surmonter ce point faible, en chapitre 3, une nouvelle approche assurant le contrôle distribué des DGs des micro-réseaux en se basant sur la théorie de consensus adaptée pour le contrôle des micro-réseaux maillés îlotés. Ce contrôle est basé sur un réseau de communication à faible débit permettant l'échange d'informations entre les DGs voisins. Tout d'abord, le principe de l'algorithme de consensus est introduit et ses applications dans les systèmes électriques sont présentées. Après avoir prouvé son efficacité et sa robustesse par simulations à l'aide de Simscape et des tests hardware in the loop, une étude comparative entre les commandes distribuées de chapitre 2 et chapitre 3 pour le réglage primaire et le partage des puissances active et réactive consommées entre les DGs est proposée à la fin de ce chapitre. Le contrôle primaire proposé dans ce chapitre permet un partage de puissance précis entre les DGs, mais il cause la déviation de fréquence et des tensions de leurs valeurs nominale. Par conséquence, un contrôle secondaire distribué basé sur le consensus pour le rétablissement de la tension et de la fréquence dans les micro-réseaux maillés îlotés est également proposé dans ce chapitre. Comme au chapitre 2, pour étudier la stabilité du micro-réseau à plusieurs DGs et la robustesse de leurs contrôles distribués primaires et secondaires à base de consensus, un modèle d'état de l'ensemble du micro-réseau maillé est développé et validé en tenant compte de ses lignes électriques, ses charges ainsi que ses générateurs intégrant leurs contrôleurs distribués.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale, résumant les principales contributions de nos travaux sur le contrôle et l'étude de la stabilité des micro-réseaux maillés îlotés ou connectés au réseau principal, et nous présentons des perspectives des travaux à mener pour compléter nos travaux à court et moyen termes.

Introduction générale

Etat de l’art

Chapitre 1 : Etat de l'art

Les réseaux électriques alimentant les différents consommateurs dans différents pays sont alimentés pour la plupart à partir des ressources fossiles, qui ont des effets négatifs sur le plan écologique, en raison de la pollution générée par ces ressources. Cette pollution sera aggravée par l'augmentation future de la demande de la puissance électrique liée aux nouvelles charges telles que les véhicules électriques. Par conséquent, l'intérêt pour les systèmes de production d'énergie, utilisant des sources renouvelables telles que le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, est en croissance forte. L'intermittence des sources électriques à base de différents types d'énergie renouvelable constitue un inconvénient majeur pour leurs connexions directes au réseau, nécessitant l'ajout des éléments de stockage de puissances élevées. En regroupant plusieurs sources électriques à base d'énergies renouvelables au sein d'un même système appelé micro-réseau, pouvant également alimenter des charges locales, il est plus probable de réduire le degré d'intermittence avec des éléments de stockage à puissance limitée. De ce fait, un micro-réseau, défini par un regroupement de plusieurs unités de production associées aux convertisseurs contrôlables en tension et en fréquence, systèmes de stockage et charges interconnectés par des lignes électriques, peut selon la situation fonctionner en mode isolé (îloté) ou en mode connecté au réseau. En mode îloté, les micro-réseaux jouent un rôle important dans l'électrification des zones rurales et éloignés, ce qui favorise plus l'accès à l'électricité et réduit le coût des grandes lignes de transmission pour ces zones. Cela est plus justifiée pour les îles dont le coût du transport d'électricité est encore plus élevé à cause de la nécessité d'utilisation des câbles sous-marins. De même, le mode connecté au réseau des micro-réseaux ainsi conçus, intégrant chacun plusieurs sources électriques distribuées (DGs pour "Distributed Generators" en anglais) contrôlable à l'aide de convertisseurs statiques adaptés, est moins problématique en termes de stabilité et de la disponibilité de la puissance électrique et permet de réduire davantage le volume et le coût d'éléments de stockage.

Un micro-réseau qu'il fonctionne en mode îloté ou connecté au réseau peut avoir une topologie simple où les DGs et les charges sont connectés à un seul point de couplage commun (mono-PCC) ou une topologie plus complexe où les DGs et les charges sont connectés à plusieurs nœuds ou points de couplage commun (multi-PCC). Pour accroitre la disponibilité de puissance électriques des micro-réseaux multi-PCC, une solution consiste à utiliser des topologies maillées en interconnectant leurs différents nœuds de manière optimisée, ce qui rend ces micro-réseaux topologiquement reconfigurables au prix d'accroitre la complexité de la gestion dynamique des puissances actives et réactives fournies par les DGs.

Dans ce chapitre, une définition générale des micro-réseaux basés sur des générateurs distribués (DGs) est fournie avec un accent particulier sur leurs types de contrôles, notamment pour ceux qui sont interfacés par des convertisseurs de puissance contrôlables. Les différents défis de ce type de micro-réseaux est aussi introduit. Ensuite, une synthèse sur les différents types de contrôle existants pour les réglages primaire, secondaire et tertiaire des micro-réseaux, en particulier les micro-réseaux maillés, est donnée. On présente également les différents types de contrôle (commande) pour gérer le partage des puissances actives et réactives entre les générateurs distribués (DGs), en fonction de leurs valeurs nominales/disponible.

1.1. Micro-réseaux

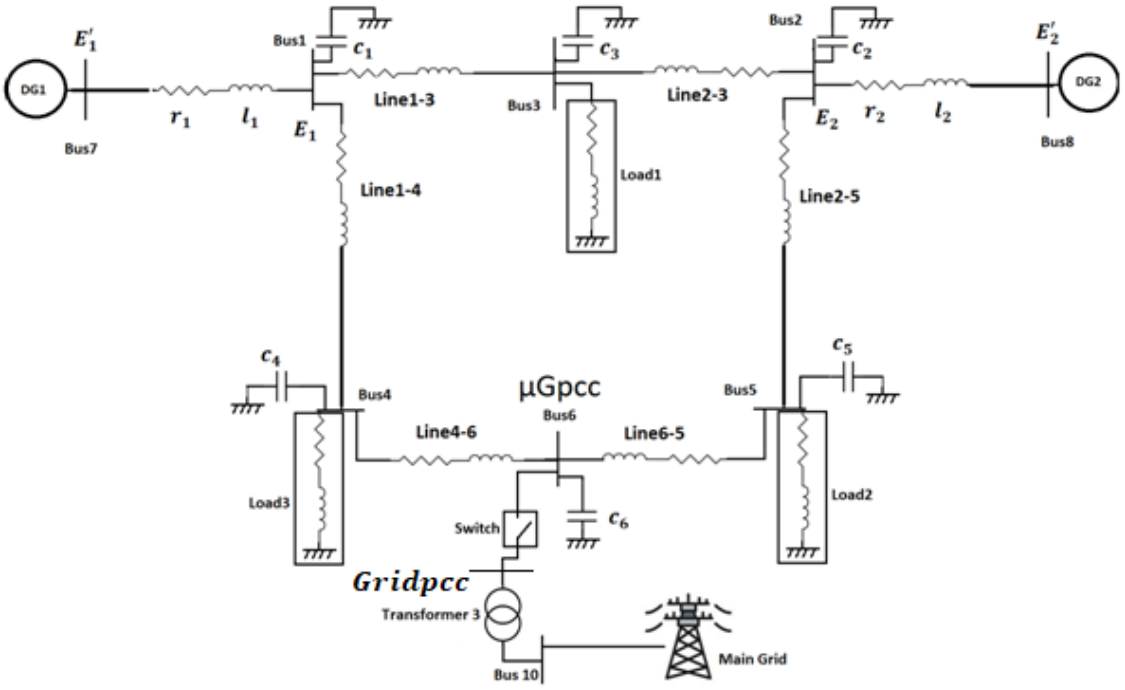
Un micro-réseau peut être décrit comme un réseau intégrant des unités de production décentralisée (DGs) et de stockage, souvent contrôlables par des convertisseurs statiques afin d'alimenter via des lignes électriques un ensemble de charges passives ou actives [1]. Les micro-réseaux de topologies simples ou complexes (Fig.1.1. a ou b) ont la possibilité de fonctionner comme un système autonome (micro-réseaux îlotés) ou d'être connectés au réseau principal en un point de connexion [2, 3].

En mode îloté, les micro-réseaux sont déconnectés du réseau principal et les puissances active et réactive demandées par ses charges sont uniquement fournies par leurs DGs et leurs éléments de

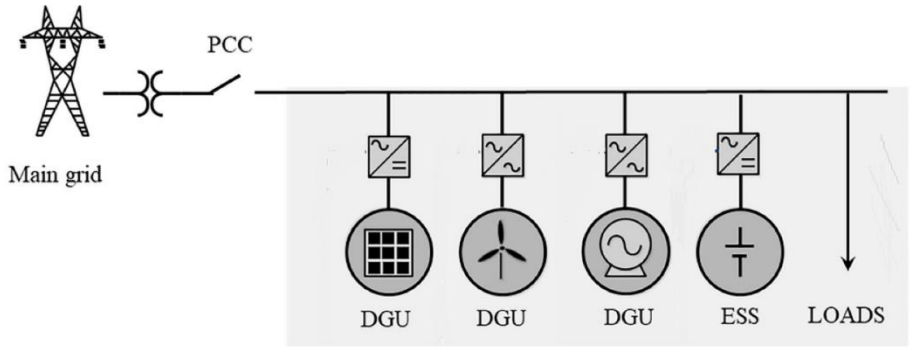
stockage. Dans ce mode de fonctionnement, les micro-réseaux présentent des problèmes spécifiques de contrôle liés à un ordre élevé du système contrôlé pour que les DGs fournissent instantanément la puissance totale consommée par les charges, vue que les variations brusques des charges peuvent modifier le sens des flux de puissance dans lignes du micro-réseau [1]. Il existe d'autres problèmes à considérer tels que le partage entre les différents DGs des puissances demandées par les charges [4], les déviations de tension et de fréquence causées par le contrôle primaire [5, 6] et la stabilité du micro-réseau [7].

En mode connecté au réseau principal du micro-réseau la demande de la charge peut être partager entre les DGs et le réseau principale. Dans ce mode de fonctionnement, les micro-réseaux présentent moins de complexité au niveau de contrôle vue que la fréquence et la tension sont imposé par le réseau principal. Cependant, même dans ce mode, certains problèmes tel que la transition entre les modes de fonctionnement en îloté et connecté au réseau qui doit être assurée de façon fluide [8], le partage des puissance actives et réactives entre les DGs et la gestion des échanges de puissance entre le micro réseau et le réseau principal devraient être considérés.

Afin de renforcer l'autonomie des micro-réseaux par rapport au réseau principal par augmentation du taux de pénétration des générateurs distribués dans ces micro-réseaux, le choix d'une architecture maillée (Fig.1.2), où les DGs et les charges sont connectés aux plusieurs nœuds interconnectés par des lignes électriques, semble être une bonne solution [9]. Ce type de configuration suscite l'intérêt de nombreuses entités telles que le Consortium pour les solutions technologiques de fiabilité électrique (CERTS) (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS)) [10]. En mode de fonctionnement îloté, les micro-réseaux de type maillé (fig.1.2) peuvent offrir une plus grande disponibilité de l'énergie que les micro-réseaux avec des architectures simples où les DGs et les charges sont connectés à un seul point de couplage commun (fig.1.1 b) [11]. Cependant, les micro-réseaux maillés de topologies plus complexes sont des systèmes d'ordre plus élevé, leur modélisation et la synthèse de contrôle de leurs DGs sont plus compliquées et nécessitent des approches spécifiques comme il est montré aux chapitres suivants.



(a)



(b)

Fig.1.1 Micro-réseau

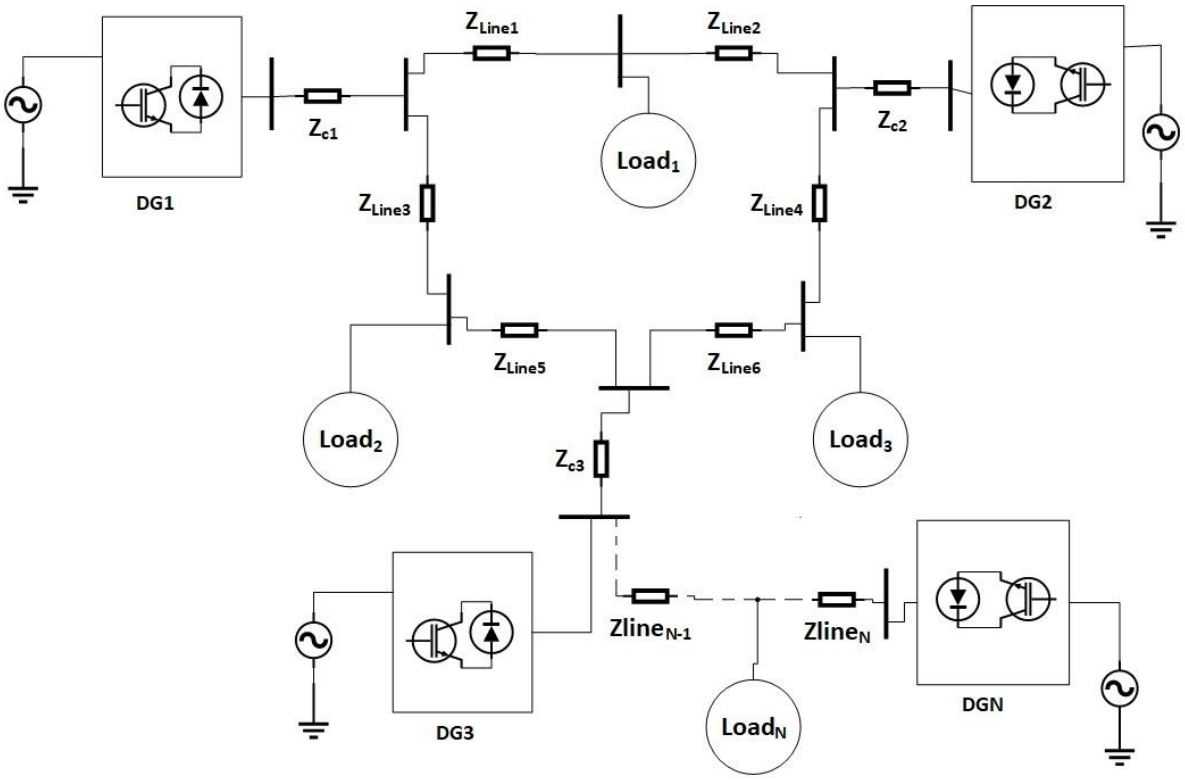


Fig.1.2 Micro-réseau maillé

1.2. Contrôle des micro-réseaux

Généralement, Il existe deux approches de contrôles dans les micro-réseaux :

La première approche est globale où le contrôle du micro-réseau se fait en générale en s'appuyant sur des approches sans modèle basée sur l'intelligence artificiel [12, 13]. La deuxième approche utilise une structure de contrôle hiérarchique pour maximiser la flexibilité du contrôle et réduire sa complexité. En utilisant cette approche, le contrôle des DGs suit une hiérarchie des architectures de systèmes électriques conventionnels comprenant trois niveaux principaux : primaire (niveau DG), Secondaire (niveau micro-réseau) et tertiaire (niveau réseau) [14, 15]. Cette hiérarchie peut assurer une stabilité globale des micro-réseaux en permettant le

découplage des flux de puissance, la restauration de la fréquence et de la tension, la compensation de la puissance réactive... [16, 17]. Les différents niveaux sont exploités en fonction de leurs fonctionnalités de contrôle et de leurs intervalles de temps selon une dépendance hiérarchique, comme le montre la figure 1.3.

Même si l'approche globale est prometteuse, l'approche hiérarchique reste plus fiable et adoptée dans la plupart des applications de micro-réseaux. Par conséquent, dans cette thèse, nous avons adopté l'approche hiérarchique pour le contrôle de notre micro-réseau.

Le contrôle primaire se situant au niveau de la première couche du schéma de contrôle hiérarchique des micro-réseaux [18]. Il fonctionne à l'échelle de temps la plus rapide de (de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes). Le contrôle primaire fournit non seulement une interface contrôlable entre les charges et les sources [19, 20], mais il permet aussi la gestion des puissances actives et réactives des DGs en utilisant leurs mesures aux niveaux locales, maintient la stabilité de la tension et de la fréquence du micro-réseau et fournit également la fonctionnalité plug and play [21].

Le contrôle secondaire a pour but de fournir les références pour le contrôle primaire et de compenser les écarts de tension et de fréquence introduits par ce dernier [1]. Il peut également faciliter la synchronisation du micro-réseau avec le réseau principal. Cette couche de contrôle agit sur une échelle de temps plus lente que le contrôle primaire (de quelques secondes à quelques minutes).

Le contrôle tertiaire a pour objectif de fournir les références pour le contrôle secondaire [22], d'améliorer la stabilité de fonctionnement du système [23] et de gérer de manière optimale les interactions soit entre les micro-réseaux voisins soit entre un micro-réseau et le réseau de distribution principal. Les critères d'optimisation peuvent concerner l'optimisation de l'efficacité énergétique du système, comme la gestion du flux d'énergie, la tarification optimale, la coordination avec le gestionnaire du réseau de distribution et la gestion du stockage d'énergie à long terme [1], [19]. Cette couche de contrôle se situe au niveau le plus élevé de la hiérarchie et agit donc relativement de la manière la plus lente (quelques minutes à quelques heures). Le contrôle tertiaire peut aussi intervenir pour soulager la réserve secondaire, en cas de perte d'une grande puissance de production ou de charge, ou pour corriger les erreurs de prévision [24].

À chaque niveau de contrôle dans l'approche hiérarchique (primaire, secondaire et tertiaire), le contrôleur peut être implémenté de plusieurs manières à savoir : architecture centralisée, décentralisée et distribuée [25].

- Dans le contrôle décentralisé, comme montré sur la figure 1.4, le contrôle du système est assuré par plusieurs contrôleurs locaux individuels sans avoir besoin de communiquer entre eux, ce qui rend le fonctionnement du micro-réseau indépendant des liaisons de communication [1, 26]. Malgré la haute fiabilité et la flexibilité qu'offre le contrôle décentralisé, une répartition précise de puissances (notamment la puissance réactive) entre les DGs des micro-réseaux maillés reconfigurables avec des topologies complexes n'est pas assurée en raison d'absence d'information entre leurs contrôleurs locaux.
- Le contrôle centralisé traditionnel classique (figure 1.5) utilise une unité centrale qui assure le contrôle du micro-réseau. L'application de cette stratégie de contrôle nécessite une communication bidirectionnelle à grande vitesse entre le contrôleur centralisé et les différents DGs, ce qui exige un système de communication étendu pour collecter et traiter les informations massives de tous les DGs. En conséquence, L'application de cette stratégie de contrôle risque d'augmenter la sensibilité du système aux pannes et diminue sa fiabilité, ce qui conduit à un point de défaillance unique (single point of Failure ou SPOF) [25].

- Dans le contrôle distribué illustré sur la figure 1.6, chaque DG est contrôlé par un contrôleur qui lui est destiné. Il consiste en un grand nombre de contrôleurs locaux situés dans différentes sections du micro-réseau et connectés via un réseau de communication à faible débit [27]. Les avantages du contrôle distribué sont qu'il est aussi robuste que le contrôle décentralisé, mais son application n'entraîne pas de point de défaillance unique.

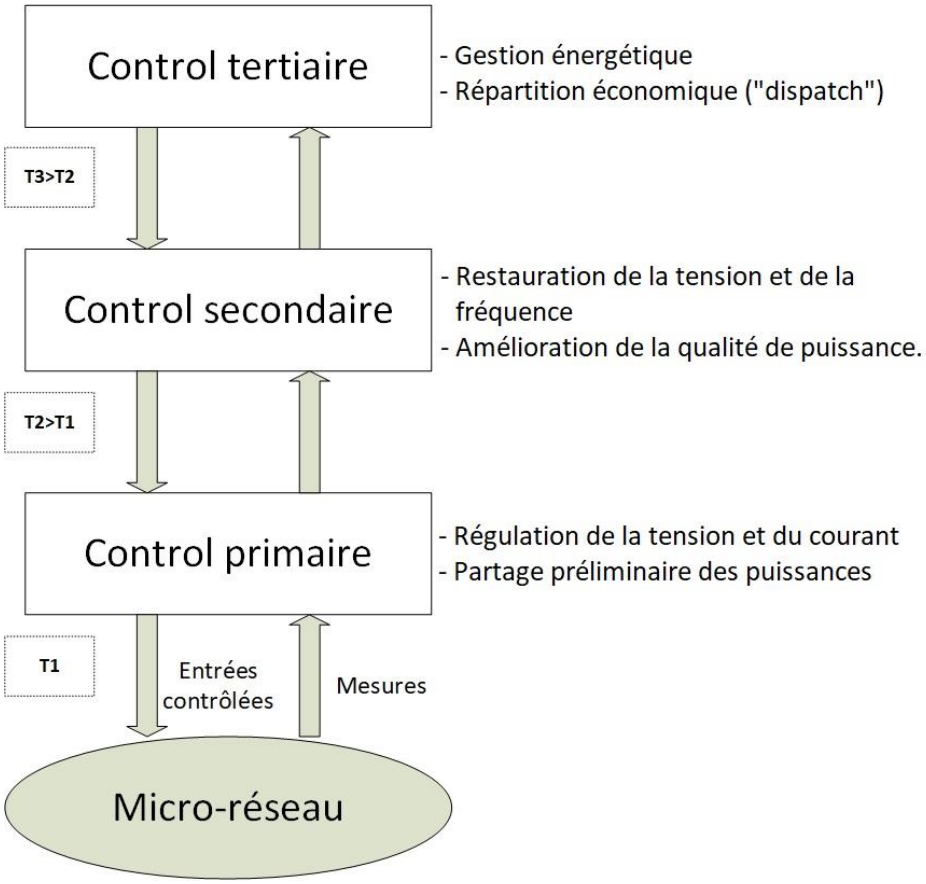


Fig.1.3 Stratégie de contrôle hiérarchique des micro-réseaux

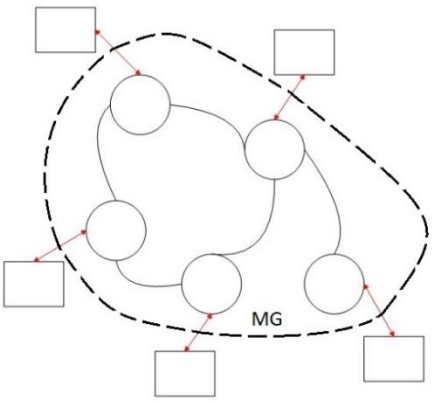


Fig.1.4 Contrôle décentralisé (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur)

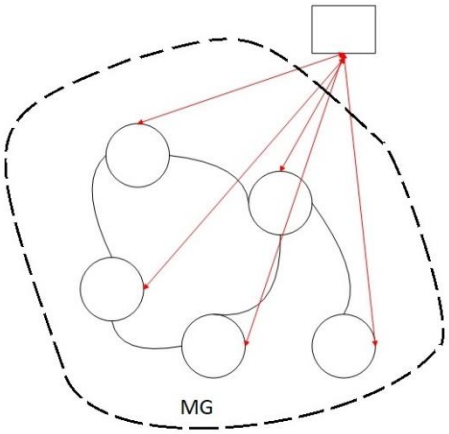


Fig.1.5 Contrôle centralisé (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur)

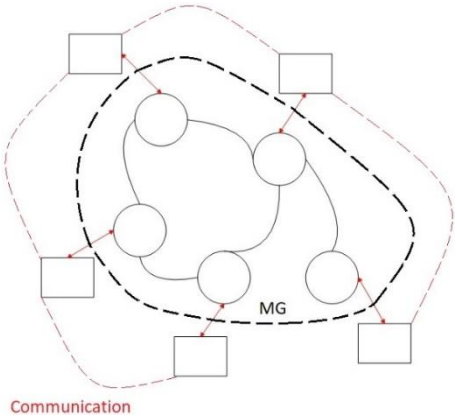


Fig.1.6 Contrôle distribué (le cercle est un élément du micro-réseau et le carré est le contrôleur)

1.3. Contrôle local d'un générateur distribué (DG)

Généralement, chaque DG est souvent intégré à un micro-réseau via un onduleur de tension et un filtre LC [28, 29]. L'onduleur produit une tension de sortie alternative à partir d'une source continue. En admettant que la puissance devant être fournie par un DG est inférieure à la fois de la puissance disponible du DG et de sa puissance maximale autorisée, les convertisseurs statiques connectant la source d'énergie renouvelable (éolienne, hydraulique, solaire, …) et les éléments de stockage (batteries, super condensateur, …) au bus continue de l'onduleur ont pour rôle de contrôler la valeur de sa tension. Ainsi, dans ce qui suit nous admettons que la tension de la source continue de l'onduleur est fixée à une valeur assurant la contrôlabilité des courants de sortie de l'onduleur. Le filtre LC de sortie a pour rôle de filtrer les composantes hautes fréquences de la tension de sortie de l'onduleur et de réduire ainsi les harmoniques indésirables du spectre du courant de sortie [30].

Il existe deux types d'approches de contrôle des DG d'un micro-réseau. Le premier type est appelé "les DG suivant le réseau" ("Grid-following DG" en anglais), où la fréquence et la tension sont définies par le réseau principal et les DG sont contrôlés en puissance [31]. Le second type est appelé "les DG formant le réseau" ("Grid-forming DG" en anglais) où les références de fréquence et de tension du micro-réseau sont définies par les contrôleurs locaux de chaque DG. Ces références qui peuvent être fournit par le contrôle secondaire sont imposées par le contrôle primaire. Dans les travaux présentés

dans cette thèse, les micro-réseaux étudiés peuvent fonctionner soit en mode îloté soit en mode connecté au réseau. Dans les deux cas, seule le seconde approche de commande des DGs (DGs formant le réseau) est utilisée. Dans ce qui suit le contrôle primaire d'un DG est détaillé.

1.3.1. Contrôle primaire d'un DG

En général, dans l'approche de commande "DG formant un réseau" le contrôle primaire d'un DG du micro-réseau peut être décomposé en deux parties qui se complètent. La première partie (boucles externes ou contrôleurs de puissance), ayant pour rôle de contrôler les puissances active et réactive du DG considéré générant la référence du vecteur tension (en module et en argument) devant être imposé à son point de connexion au micro-réseau. La deuxième partie (boucles internes ou contrôleurs internes) ayant pour rôle de faire suivre la référence du vecteur tension (donnée par les boucles externes) en agissant sur les composantes du vecteur courant du filtre de sortie de l'onduleur du DG considéré. La figure 1.7 montre une configuration complète d'un convertisseur interfacé avec des blocs de commande représentant le contrôleur de puissance et la boucle de contrôle interne de l'onduleur. Les convertisseurs sont contrôlés localement de manière à fournir la puissance souhaitée au micro-réseau. Dans ce cas, comme le montre la figure 1.7, seuls les signaux locaux ($\vec{V}_c$, $\vec{I}_{\mu r}$, $\vec{I}_L$) sont utilisés comme les retours d'état pour contrôler les différentes boucles internes et externes du DG et générer ainsi les références de tension de l'onduleur commandé généralement en modulation de largeur d'impulsion (MLI). $\vec{V}_c$ est le vecteur tension de sortie du filtre LC au point de connexion du DG considéré. $\vec{I}_{\mu r}$ est le vecteur courant fourni par le DG au micro-réseau. $\vec{I}_L$ est le vecteur courant de sortie de l'onduleur passant par les inductances du filtre LC de sortie.

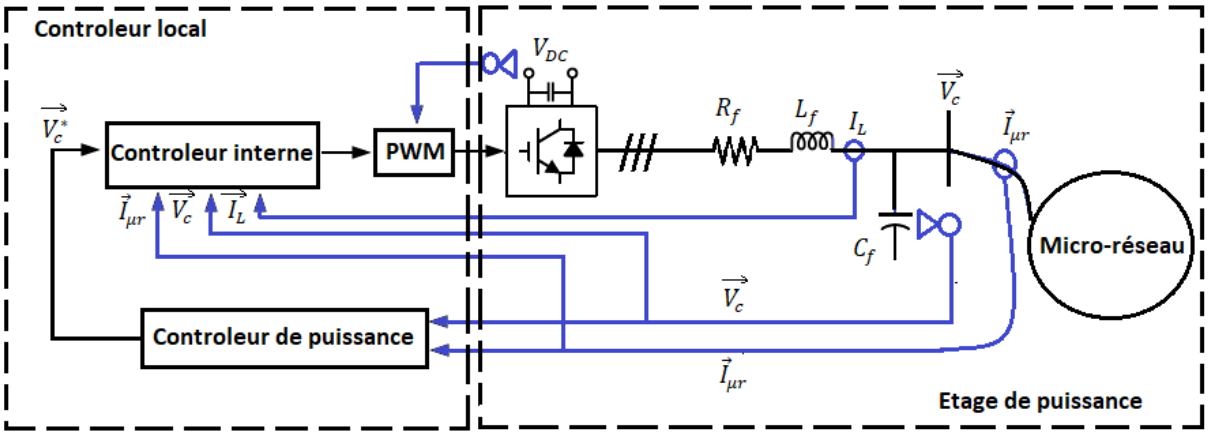


Fig.1.7 Schéma bloc de commande du convertisseur interfacé.

1.3.1.1. Contrôleur interne du contrôle primaire d'un DG

La technique la plus utilisée pour le contrôle interne des convertisseurs statiques est le contrôle linéaire à base de régulateurs PI. Dans les applications industrielles, le régulateur PI est bien connu et présente l'avantage de pouvoir être implémenté de manière analogique ou numérique [32, 33, 34, 35]. Par conséquent, dans cette thèse, la commande hiérarchique classique utilisant des régulateurs PI est utilisée pour la commande interne des DG. Il existe d'autres stratégies de commande dans la littérature pour le contrôle des boucles internes des DG, comme la stratégie basée sur la platitude [36, 37, 38, 39]. Cette approche permet d'obtenir des performances dynamiques plus élevées, une distorsion harmonique totale (THD) de la tension la plus faible et une meilleure robustesse face aux variations des paramètres par rapport au contrôle classique PI hiérarchique. Il existe également la méthode de contrôle à pas de recul (Backstepping Controller) [39]. Cette méthode de contrôle a

prouvé sa robustesse face à différents scénarios de fonctionnement pratiques et aux paramètres inconnus des composants du système contrôlé. Ces méthodes ne sont pas utilisées dans cette thèse mais peuvent être implémentées pour améliorer sa robustesse si nécessaire, notamment dans le cas où l'ordre du système est trop élevé.

En utilisant des régulateurs PI classiques pour imposer la tension désirée au point de connexion du DG au micro-réseau, nous avons synthétisé deux boucles de contrôle en cascade permettant de contrôler les composantes d-q de la tension aux bornes des condensateurs et le courant des inductances du filtre LC (Figure 1.7). La figure 1.8 montre le schéma des boucles de contrôle utilisées et les équations (1.1) et (1.2) donnent les équations permettant de déterminer les références des composantes d-q de la tension de l'onduleur (V_d^* et V_q^*) et du courant de l'inductance du filtre LC, en considérant les termes de découplage de leurs contrôles. $\boldsymbol{L_f}$ et $\boldsymbol{C_f}$ dans les équations (1.1) et (1.2) représentent respectivement l'inductance et le condensateur du filtre de sortie.

En admettant que les sommes des courants des phases des DG, des charges et des lignes des micro-réseaux considérés sont nulles, les composantes homopolaires des différentes variables du système n'interviennent pas dans les échanges des puissances active et réactive. Seules les composante *d-q* des différents vecteurs tension et courant sont donc considérées et obtenues à partir de leurs composantes *abc* en appliquant la transformation de Concordia $\boldsymbol{T_{32}^t}$ et la matrice de rotation $P(-\theta)$, comme exprimé dans (1.3). Il convient de noter que θ est obtenu par la relation (1.4) intégrant la pulsation ω du DG considéré. Elle est générée par la boucle extérieure du contrôleur de puissance.

Boucle de courant :
$$\begin{cases} V_d^* = K_i(I_{Ld}^* - I_{Ld}) + \frac{K_i}{T_i}\int (I_{Ld}^* - I_{Ld}).dt + V_{cd} - I_{Lq}\omega L_f \\ V_q^* = K_i(I_{Lq}^* - I_{Lq}) + \frac{K_i}{T_i}\int (I_{Lq}^* - I_{Lq}).dt + V_{cq} + I_{Ld}\omega L_f \end{cases} \quad (1.1)$$

Boucle de tension :
$$\begin{cases} I_{Ld}^* = K_v(V_{cd}^* - V_{cd}) + \frac{K_v}{T_v}\int (V_{cd}^* - V_{cd}).dt + I_{\mu r-d} - V_{cq}\omega C_f \\ I_{Lq}^* = K_v(V_{cq}^* - V_{cq}) + \frac{K_v}{T_v}\int (V_{cq}^* - V_{cq}).dt + I_{\mu r-q} + V_{cd}\omega C_f \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = P(-\theta_i).\boldsymbol{T_{32}^t}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = P(-\theta).\boldsymbol{T_{32}^t}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ -i_a - i_b \end{bmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = P(-\theta_i).\boldsymbol{T_{32}^t}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = P(-\theta).\boldsymbol{T_{32}^t}\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$
$$\boldsymbol{T_{32}^t} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} cos\,\theta & -sin\,\theta \\ sin\,\theta & cos\,\theta \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int \omega.dt \quad (1.4)$$

Les dynamiques des deux boucles de régulation sont séparées de manière à ce que la dynamique de la boucle de courant soit plus rapide que celle de la tension. Il est à noter que la dynamique de la boucle de tension est réglée à son tour pour être plus rapide que la dynamique des boucles externes des puissances active et réactive (Figure 1.7).

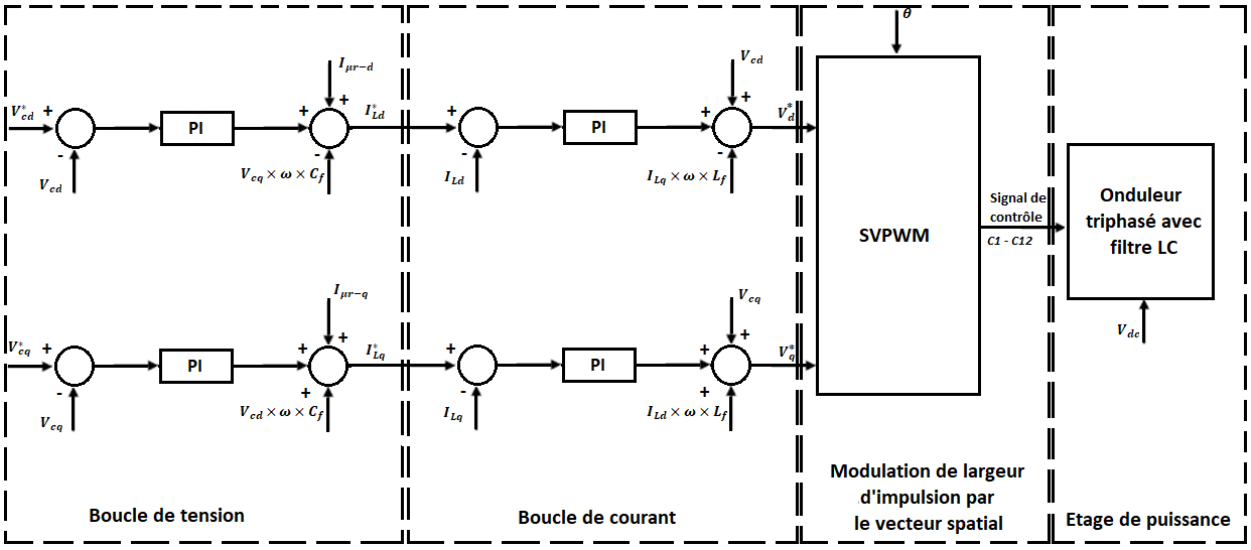


Fig.1.8 Diagramme fonctionnel du contrôle hiérarchique.

1.3.1.2. Contrôleur de puissance ou externe

Généralement, le contrôle de la puissance dans le contrôle primaire est basé sur un contrôle décentralisé utilisant des stratégies de statisme ("Droop Control" strategy en anglais) [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]. L'idée principale derrière la commande de statisme pour les convertisseurs d'interface des DGs vient du fait que l'onduleur de tension va être contrôler de manière à imiter le comportement statique et même dynamique des générateurs synchrones [48].

- **Puissance délivrée à une source de tension**

La figure 1.9 illustre une source de tension qui décrit un générateur distribué DG-i, modélisé par une source de tension $\bar{v}_i = V_i \angle \delta_i$ [x, y, z], fournissant de l'énergie à un bus commun modélisé par une source de tension $\bar{v}_0 = V_0 \angle 0$ à travers une impédance $\bar{Z}_i = Z_i \angle \theta_i$. V_0 et V_i sont les valeurs efficaces des sources de tension et Z_i est le module d'impédance de ligne reliant les deux sources. L'argument de tension du bus commun $\bar{v}_0$ est supposé nul. Puisque le courant traversant la borne s'écrit comme suit (1.5) :

$$\bar{\imath} = \frac{V_i \angle \delta_i - V_0 \angle 0^\circ}{Z_i \angle \theta_i} = \frac{V_i e^{j(\delta_i - \theta_i)} - V_0 e^{-j\theta_i}}{Z_i} \qquad (1.5)$$

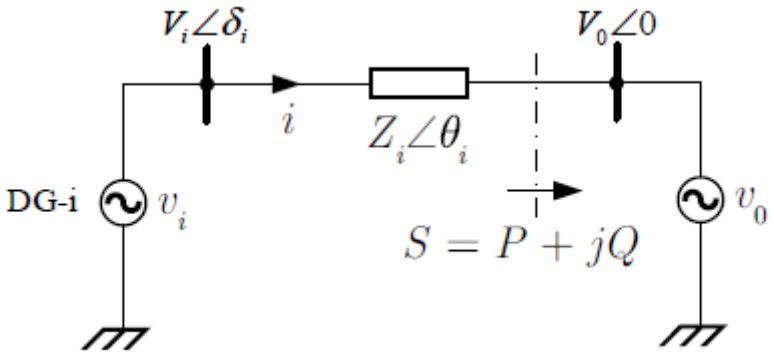


Fig.1.9 Générateur distribué Délivrant la puissance au bus infini par l'impédance $\overline{Z_i}$ [31]

En se basant sur la puissance apparente en (1.6) La puissance active et réactive délivrée par la source au bus commun via l'impédance $\overline{Z}_i$ peut être obtenue par (1.7) :

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{v}_0 \cdot \bar{\imath}^* = V_0 \cdot \frac{V_i e^{-j(\delta_i - \theta_i)} - V_0 e^{j\theta_i}}{Z_i} \tag{1.6}$$

$$\begin{cases} P = (\frac{V_i V_0}{Z_i} \cos\delta_i - \frac{V_0^2}{Z_i}) \cos\theta_i + \frac{V_i V_0}{Z_i} \sin\delta_i \sin\theta_i \\ Q = (\frac{V_i V_0}{Z_i} \cos\delta_i - \frac{V_0^2}{Z_i}) \sin\theta_i - \frac{V_i V_0}{Z_i} \sin\delta_i \cos\theta_i \end{cases} \tag{1.7}$$

Où δ_i est la différence de phase entre l'alimentation et la borne, souvent appelée angle de puissance. Cette démonstration reflète la situation dans laquelle un générateur distribué est connecté dans un micro-réseau via une ligne d'alimentation à un bus de tension terminale V_0.

- **Contrôle Droop conventionnel**

Comme le montre la Fig. 1.9, l'onduleur commandé en tension est modélisé comme une source de tension idéale $\bar{v}_i$ en série avec une impédance de ligne $\overline{Z}_i = Z_i \angle\theta_i$. Pour différents types d'impédances de ligne, différentes stratégies de commande Droop peuvent être obtenues [31].

a. Pour une impédance de ligne purement résistive :

Lorsque l'impédance de la ligne est purement résistive, θ_i = 0. Alors les puissances actives et réactives peuvent être exprimées comme dans (1.8) :

$$\begin{cases} P = \frac{V_i V_0}{Z_i} \cos\delta_i - \frac{V_0^2}{Z_i} \\ Q = -\frac{V_i V_0}{Z_i} \sin\delta_i \end{cases} \tag{1.8}$$

Quand δ_i est petit alors les puissances actives et réactives peuvent être exprimées comme dans (1.9)

$$\begin{cases} P \approx \frac{V_i V_0}{Z_i} - \frac{V_0^2}{Z_i} = \frac{V_i - V_0}{Z_i} \cdot V_0 \\ Q \approx -\frac{V_i V_0}{Z_i} \cdot \delta_i \end{cases} \tag{1.10}$$

Et approximativement,

$$P \sim V_0 \; et \; Q \sim -\delta_i$$

Sachant que δ est une fonction de de ω, l'équation de contrôle du Droop peut s'écrire comme suit dans (1.11) [31] :

$$\begin{cases} V_i = V_n - n_i P_i \\ \omega_i = \omega_n + m_i Q_i \end{cases} \tag{1.11}$$

Cette stratégie est illustrée à la Fig. 1.10.

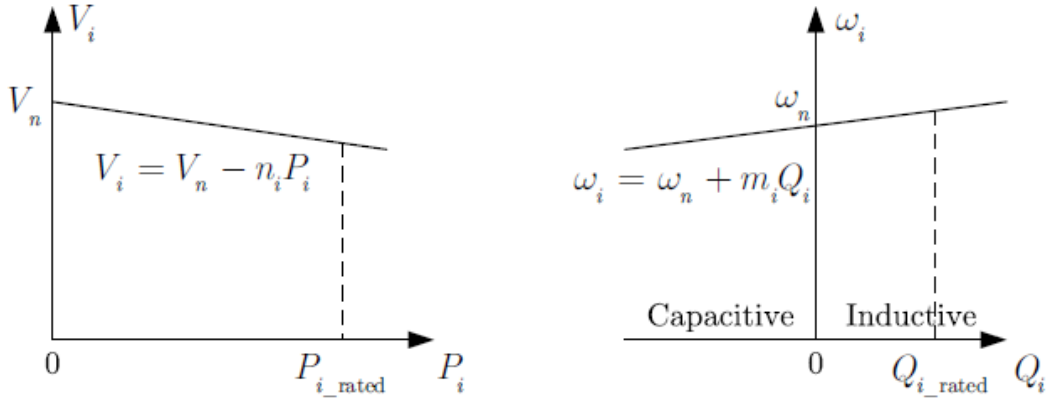


Fig.1.10 Pour une impédance purement résistive [31]

b. Pour une impédance de ligne purement inductive :

Lorsque l'impédance de la ligne est inductive, θ_i = 90. Comme en [31] on a (1.12) :

$$\begin{cases} P = \frac{V_i V_0}{Z_i} \sin \delta_i \\ Q = \frac{V_i V_0}{Z_i} \cos \delta_i - \frac{V_0^2}{Z_i} \end{cases} \quad (1.12)$$

Quand δ_i est petit on a (1.13)

$$\begin{cases} P \approx \frac{V_i V_0}{Z_i} \delta_i \\ Q \approx \frac{V_i V_0}{Z_i} - \frac{V_0^2}{Z_i} \end{cases} \quad (1.13)$$

Et approximativement,

$$Q \sim V_0 \; et \; P \sim \delta_i$$

Sachant que δ_i est une fonction de de ω, l'équation de contrôle du droop peut s'écrire comme en (1.14) [31] :

$$\begin{cases} V_i = V_n - n_i Q_i \\ \omega_i = \omega_n - m_i P_i \end{cases} \quad (1.14)$$

Cette stratégie est illustrée à la Fig. 1.11.

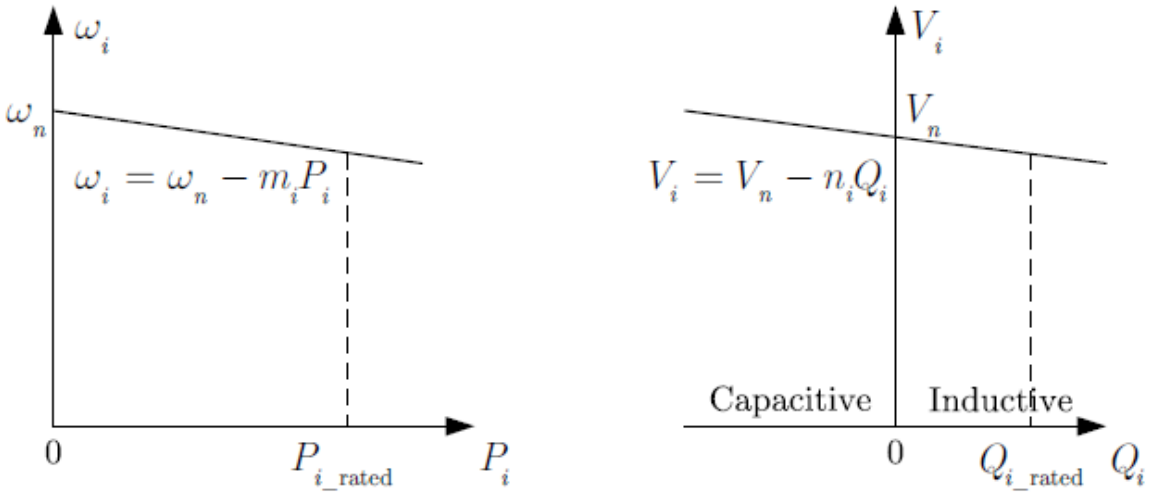


Fig.1.11 Pour une impédance purement inductive [31]

Pour mettre en œuvre la méthode Droop, les équations (1.14) sont utilisées, pour générer les références de la valeur efficace de la tension entre phase au point de connexion du DG considéré au micro-réseau (V_i) et sa pulsation (ω_i), en utilisant les puissances active et réactive mesurées et filtrées du DG (P_i et Q_i). Le filtrage des puissances est réalisé à l'aide de filtres passe-bas à bande passante réduite.

Dans les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, l'impédance de la ligne est principalement inductive (θ_i = 90), c'est la raison pour laquelle il est adopté d'utiliser les Droops P-ω et Q-V présentés par les équations (1.14).

Afin d'ajouter la fonction de partage de la puissance active et réactive des DG en fonction de leurs puissance nominales/disponibles, l'équation de contrôle Droop est transformée en (1.15) et (1.16) et leurs caractéristiques sont montrées dans la figure 1.12.

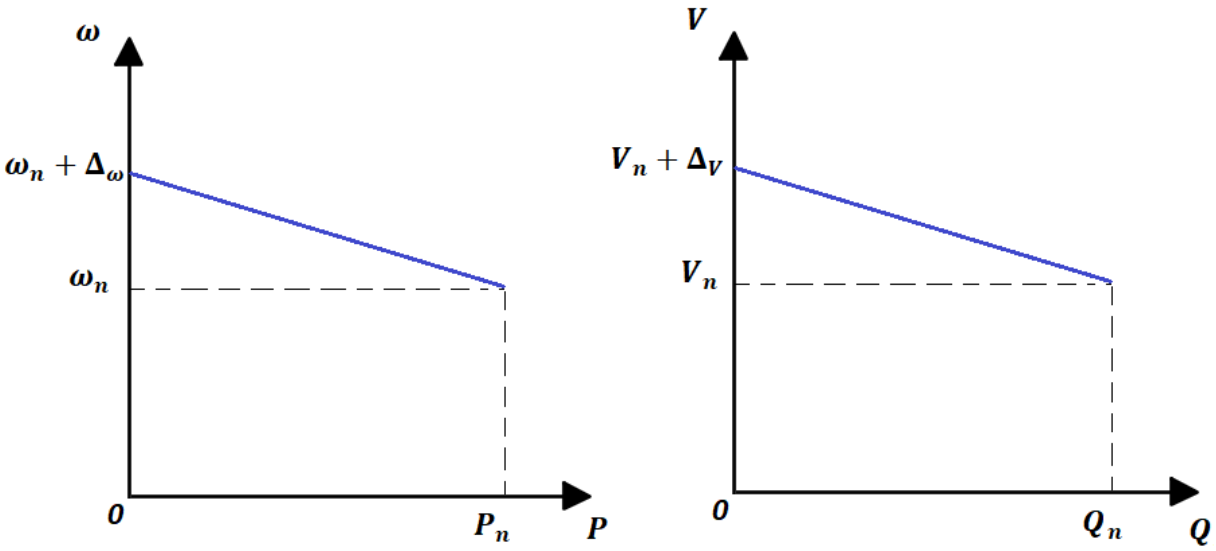


Fig.1.12 Caractéristiques générales du Droop control pour des lignes inductives

$$\omega_i = \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) \quad (1.15)$$

$$V_i = V_n - n_i(Q_i - Q_{in}) \quad (1.16)$$

Avec,

- P_i Et Q_i sont les valeurs mesurées et filtrées des puissances active et réactive du DG.
- P_{in} Et Q_{in} sont les valeurs nominales ou maximales disponibles des puissances active et réactive du i^{ème} DG.
- ω_n Et V_n sont les valeurs nominales de la pulsation et de la valeur efficace de la tension entre phase du micro-réseau.

Les coefficients de statisme m et n peuvent être exprimés comme indiqué en (1.17) ci-dessous :

$$\begin{cases} m_i = \frac{\Delta\omega}{P_{in}} \\ n_i = \frac{\Delta V}{Q_{in}} \end{cases} \quad (1.17)$$

Avec $\Delta\omega$ et ΔV les variations admissibles de la pulsation et de la tension du micro-réseau.

Parmi les avantages des méthodes de contrôle du statisme, on peut notamment souligner le fait qu'elles sont entièrement décentralisées et ne nécessitent aucune communication. De plus elles sont faciles et simples à mettre en œuvre et offrent une fiabilité et une flexibilité élevées. Cependant, ce type de contrôle possède quelques points faibles [30, 49, 50, 51], notamment :

- Réponse dynamique lente : comme mentionné précédemment, la mise en œuvre de la commande Droop (les équations (1.15) et (1.16)) qui fournit les références de la tension et de la fréquence nécessite un filtrage des puissances active et réactive mesurées dont la dynamique doit être plus lente que celles des boucles internes qui ont pour rôle d'imposer ces références. Ce qui entraîne une réponse transitoire lente de la commande Droop.
- Partage inefficace des puissances entre les DG : En pratique, les lignes électriques dans les micro-réseaux ont des inductances et des résistances non négligeables, entraînant des chutes de tension qui créent un couplage fort entre la puissance active et la puissance

réactive fournies par les DGs aux charges. Cela entraine un partage inefficace des puissances, en particulier la puissance réactive, entre les DGs par la commande de Droop.

- Déviations de fréquence et de tension : La tension et la fréquence dans un micro-réseau îloté dépendent de la charge alors que la précision du partage de la puissance est déterminée par les paramètres de la commande Droop. Cela conduit à un compromis inhérent entre la régulation de la fréquence et de la tension ainsi que la précision du partage de la puissance. En effet, plus les coefficients de statisme (m_i et n_i dans la relation (1.17)) sont élevés, la précision du partage des puissances est plus élevée et la déviation de la tension et de la fréquence est plus importante.
- Ignorance de la dynamique de variation des charges : Cet inconvénient peut entraîner une défaillance du système suite à un changement important ou rapide des charges passives ou actives.
- Inadaptation de la commande Droop classique aux charges non linéaires : Lorsque la puissance consommées par des charges actives non linéaires telles que les charges absorbant une puissance constante (entrainement électriques alimentés par des convertisseurs commandés) ou les charges connectées via un pont de diodes dépasse une certaine limite, le contrôle du micro-réseau par la commande Droop classique peut être fortement perturbé (assurer la stabilité du système ou tenir compte des courants harmoniques).
- Incapacité d'imposer une fréquence fixe au système indépendamment des conditions de sa charge.

1.3.1.2.1. Méthodes de contrôle décentralisées pour le réglage primaire

Pour surmonter les inconvénients de la méthode du statisme de contrôle conventionnelle mentionnée ci-dessus tout en gardant le contrôle des DG décentralisé, les auteurs de [52, 53] proposent un statisme de contrôle de l'angle de puissance ("Angle Droop Control") pour les micro-réseaux mono-PCC. En utilisant cette méthode, l'angle de tension de chaque DG est contrôlé directement et réglé par rapport à une référence temporelle commune au lieu de le contrôler indirectement par variation de la fréquence du réseau comme dans le cas du statisme de contrôle conventionnel. Dans ce contrôle, le partage des puissances active et réactive consommées entre les DG est assuré sans déviation significative de la fréquence ou de la tension. Le contrôle proposé est décentralisé et n'a pas besoin de communication entre les DG, à part un signal pour synchroniser les contrôleurs locaux des DG (utilisé au niveau des PLLs de chaque onduleur de tension (VSI)). Cependant, comme nous le verront au chapitre 2, lorsque cette méthode est appliquée pour le contrôle des DGs de micro-réseaux maillés à topologies plus complexes, son efficacité pour le partage des puissances notamment la puissance réactive est réduite.

D'autres auteurs dans [50, 54, 55, 56] ont proposé des solutions pour résoudre le problème de couplage des puissances causé par les impédances des lignes électriques en utilisant la méthode de l'impédance virtuelle de sortie ("Virtual Output Impedance"). Cette méthode rend inductive le comportement des lignes de transport par la commande pour que la tension de chaque DG ne dépend pas de sa puissance active. Cela est réalisée en faisant chuter la tension de sortie proportionnellement à la dérivée du courant de sortie par rapport au temps. En pratique, cette méthode est mise en œuvre par l'ajout d'une boucle de contrôle rapide à la sortie du contrôle primaire afin d'émuler le comportement inductif en fixant l'impédance de sortie de l'onduleur. Cependant, des problèmes de stabilité haute fréquence peuvent apparaître en raison d'une amplification de modes résonants via les commandes internes des VSI. De plus, en raison de changements constants dans l'architecture du micro-réseau (fonctionnement plug & play), le choix de la valeur d'impédance virtuelle peut devenir délicat.

Afin de compenser la chute de tension sur les lignes de transmission, les auteurs de [57] proposent un contrôle adaptatif du statisme pour les convertisseurs de tension des DGs dans un micro-réseau îloté, où chaque référence de tension de convertisseur de tension est contrôlée de manière adaptative comme une fonction non linéaire de ses puissances de sorties active et réactive. En plus, cette méthode assure un partage efficace de la puissance active et réactive consommées entre les DGs. Cependant, elle nécessite une bonne connaissance des paramètres des lignes électriques pour qu'elle soit appliquée, ce qui peut être difficile à réaliser dans les micro-réseaux maillés en raison de leurs topologies complexes.

Les auteurs de [58] proposent une approche adaptative décentralisée, basée sur l'utilisation de la rétroaction dynamique incorporant des filtres passe-haut, pour le partage de la puissance sans contrôle de statisme permettant en même temps de limiter les déviations de tension et de fréquence, ce qui ne suggère pas le besoin d'un autre contrôle secondaire. Comme la commande de statisme, l'approche proposée ne nécessite pas de communication. Cependant, le partage de la puissance réactive consommée entre les DG n'est pas précis.

1.3.1.2.2. Méthodes de contrôle centralisées pour le réglage primaire

Dans [11], les auteurs utilisent une régulation adaptative des impédances virtuelles pour réaliser un partage précis des puissances active et réactive sans aucune connaissance de la configuration détaillée du micro-réseau. Malgré son efficacité, même dans des micro-réseaux maillés complexes, l'application de cette stratégie de contrôle nécessite une communication bidirectionnelle à grande vitesse entre un contrôleur centralisé et les DG, ce qui exige un système de communication étendu pour collecter et traiter les informations massives de tous les DG. Par conséquent, cela augmente la sensibilité du système aux pannes et diminue sa fiabilité.

Un autre contrôleur centralisé est proposé pour un micro-réseau où les charges et les DGs sont connectés au même bus triphasé alternatif dans [29], [42]. Dans ce cas, le courant total des charges est mesuré et transmis au contrôleur central. Ensuite, en fonction des caractéristiques de chaque DG, la contribution de chaque unité est déterminée et les consignes du courant de sortie sont renvoyés en retour (du contrôleur centralisé) aux contrôleurs internes de chaque DG. Cependant, la communication est cruciale et sa défaillance entraînera l'arrêt total du système.

Dans [59], les auteurs ont proposé une méthode centralisée pour le contrôle de la tension et le partage des puissances active et réactives consommées entre les DGs. Les propriétés particulières de cette méthode sont qu'elle ne nécessite qu'un lien de communication à faible bande passante entre les DGs et le contrôleur centrale et qu'elle est capable de fournir une bonne performance de rejet des perturbations afin de supprimer la distorsion harmonique et le déséquilibre. La méthode est basée sur la répartition de la commande entre un contrôleur centralisé à faible bande passante, fournissant une partie du courant de référence aux onduleurs et des contrôleurs à large bande passante distribués localement à chaque onduleur. Même si cette méthode ne nécessite pas de système de communication étendu, elle reste exposée à un point de défaillance unique, c'est-à-dire que si une erreur se produit dans le contrôleur central, tout le système s'arrête.

1.3.1.2.3. Méthodes de contrôle distribuées pour le réglage primaire

Comme mentionné précédemment, l'inconvénient des méthodes de contrôle décentralisées à base d'impédance virtuelle est qu'en raison des changements continus dans le fonctionnement du micro-réseau, la conception de l'impédance implémentée peut être difficile. En conséquence, les auteurs de [60, 61] ont proposé des boucles d'impédance virtuelle adaptatives pour compenser ces variations. Le contrôle dans [60, 61] applique la théorie du consensus pour l'ajustement de l'impédance virtuelle prédéfinie à l'aide d'un système de communication de proche en proche entre DGs à bas débit. En se basant sur une référence commune générée par l'algorithme de consensus utilisant les informations

échangées, la correction est réalisée pour chaque DG par un contrôleur Proportionnel-Intégral (PI) classique. L'idée du contrôle proposé est de supprimer les déséquilibres de puissance réactive entre les DGs même si les paramètres des lignes électriques du micro-réseau considéré changent. Le contrôle proposé est distribué et assure un partage robuste d'aussi bien la puissance active que la puissance réactive entre les DGs.

Afin de réaliser un partage précis de la puissance active et réactive entre les DG sans causer d'importantes déviations de tension ou de fréquence, les auteurs de [62], [63], ont proposé une commande sans statisme où ils ont introduit trois boucles de commande : Tension moyenne globale, puissance réactive et puissance active.

- Le contrôleur de tension moyenne globale utilise une topologie d'observateur basée sur un consensus dynamique avec un contrôleur PI ; l'observateur estime l'amplitude de la tension moyenne du micro-réseau en considérant la tension moyenne estimée des unités voisines. Ensuite, la sortie de l'observateur est comparée à une référence de tension pour générer une compensation de la tension.
- La puissance réactive est contrôlée par un contrôleur PI dont la référence est déterminée par un algorithme de consensus utilisant les mesures de puissances réactives normalisées des DGs voisins [62], [63].
- Le régulateur de puissance active compare la puissance active normalisée locale de chaque DG avec celle des DGs voisins et utilise la différence pour actualiser la fréquence et, par conséquent, l'angle de phase de cet onduleur. Cela permet de minimiser par consensus la déviation de la fréquence par rapport à sa valeur nominale.

Les déviations de fréquence sont produites pendant le fonctionnement transitoire tandis que la tension moyenne et la puissance réactive sont régulées par les contrôleurs PI avec une erreur nulle en régime permanent. Le contrôle sans statisme proposé permet d'assurer le partage de la puissance active et réactive sans déviation de la fréquence et de la tension en régime permanent.

L'algorithme de consensus est un algorithme de contrôle coordonné adopté par différents agents pour atteindre un objectif consensuel. L'étude des problèmes de consensus a commencé avec le mouvement des essaims de particules en 1995 [64]. Avec l'émergence du concept d'agents multiples, la théorie du consensus comme théorie de base du contrôle coordonné des systèmes multi-agents (MAS) a été étudiée en profondeur [65, 66, 67]. Dans la littérature [68], le problème du consensus distribué est analysé théoriquement pour la première fois. Les résultats montrent que le système de réseau avec une connectivité périodique ou une connectivité finale peut atteindre le consensus même si sa topologie change fréquemment. La théorie du consensus est largement utilisée en ingénierie, de plus en plus d'algorithmes de consensus sont appliqués au contrôle coordonné des micro-réseaux. La principale méthode consiste à considérer le réseau électrique distribué du micro-réseau comme un corps intelligent, puis à le contrôler à l'aide d'un algorithme de consensus [69, 70, 71, 72].

En se basant sur le travail de [63], les auteurs de [73] ont proposé un contrôle sans statisme amélioré où non seulement la tension moyenne globale du micro-réseau est contrôlée, mais aussi la tension à la sortie de chaque DG. Ce qui rend le control de la puissance réactive relaxé afin éviter une mauvaise régulation de la tension à la sortie des DG. Cela améliore la précision de la tension et la stabilité du micro-réseau.

1.3.2. Le contrôle secondaire

Le contrôle secondaire est généralement mis en œuvre par un contrôleur proportionnel-plus-intégral (PI) centralisé, comme le montre la figure 1.13. La structure de contrôle centralisée peut donner de

bons résultats dans certaines conditions de fonctionnement et permettre d'obtenir des solutions optimales [30]. Cependant, elle présente un risque de défaillances ponctuelles, une faible évolutivité et une faible flexibilité.

Contrairement au contrôle centralisé, les approches distribuées et décentralisées pour le contrôle secondaire permettent de coordonner les unités sans avoir recours à une entité centrale. Dans l'approche distribuée, les contrôleurs de chaque DG utilise des informations ou des estimations locales ainsi que certaines informations sur les DGs voisines pour fournir les références de la tension et de la fréquence du micro-réseau considéré, comme le montrent la figure 1.14. Dans l'approche décentralisée, les contrôleurs de chaque DG utilise uniquement des informations ou des estimations locales pour fournir les références de la tension et de la fréquence du micro-réseau considéré, comme le montrent le figure 1.15.

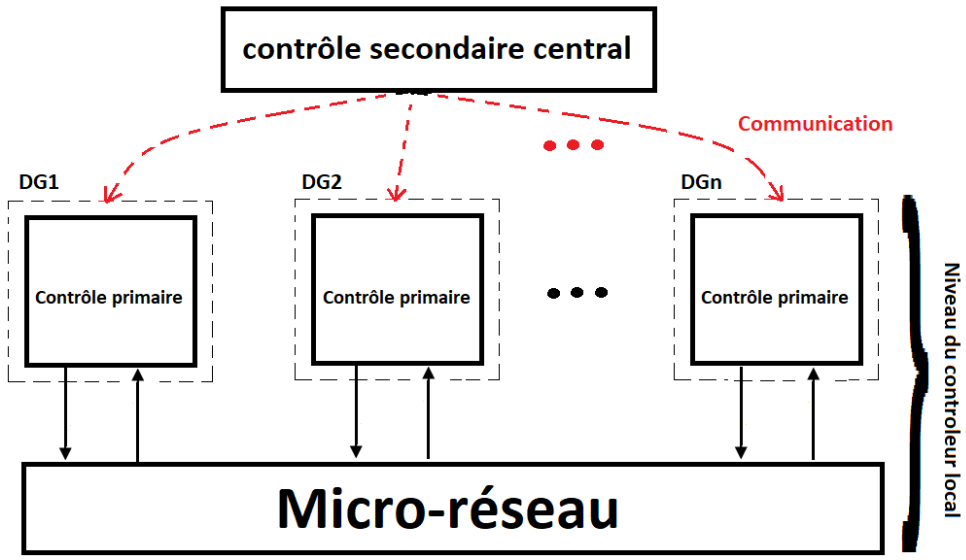


Fig.1.13 Architecture centralisée du contrôle secondaire

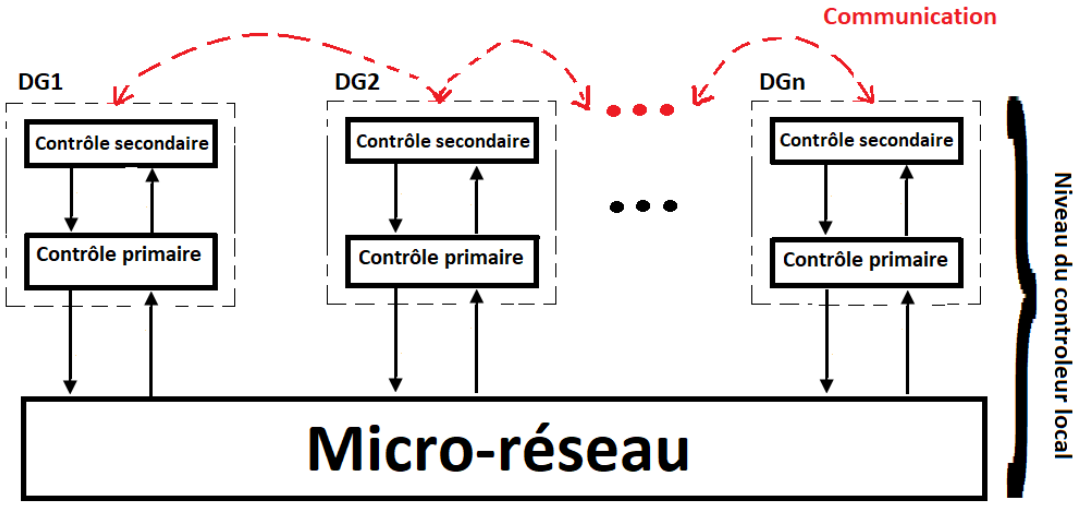


Fig.1.14 Architecture distribuée du contrôle secondaire

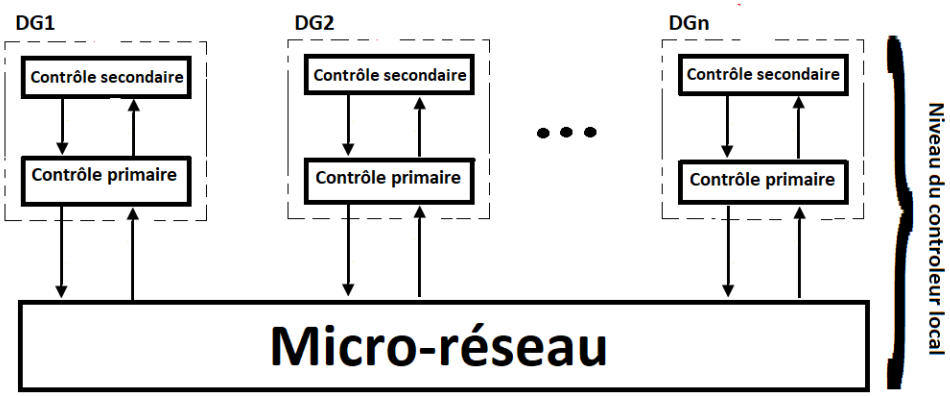


Fig.1.15 Architecture décentralisée du contrôle secondaire

1.3.2.1. Méthodes de contrôle décentralisées pour le réglage secondaire

Le contrôle secondaire décentralisé vise à résoudre le problème de gestion de l'énergie d'un micro-réseau tout en offrant la plus grande autonomie possible aux différentes DG et charges [1].

Dans [74], les auteurs proposent un régulateur linéaire quadratique (LQR) avec une structure intégrale augmentée pour éliminer l'erreur en régime permanent pour la régulation de la fréquence et le partage précis de la puissance active entre les DGs. Le contrôle proposé pour chaque DG est entièrement décentralisé sans utiliser aucune information sur les autres DGs du micro-réseau. Il garantit la stabilité et une régulation optimale de la fréquence avec une conception indépendante sans nécessité d'un système de communication.

Dans [75], un autre contrôle secondaire de la fréquence et de la tension pour les micro-réseaux îlotés est considéré. De point de vue de chaque DG, un modèle d'observateur robuste est implémenté localement et sert de rôle d'un estimateur de la dynamique des DGs voisins. Ensuite, en utilisant les états estimés, on assure la restauration de la fréquence et de la tension, ainsi qu'un partage précis de la puissance active et réactive de manière indépendante. Le contrôle proposé est basé sur un cadre entièrement décentralisé et ne nécessite pas de liens de communication. Cependant, l'efficacité de ce contrôle repose sur une modélisation précise du micro-réseau, les connaissances de sa structure (c'est-à-dire, la connexion/déconnexion des DGs et des charges) et de ses paramètres (c'est-à-dire les paramètres des lignes et les gains des contrôleurs).

1.3.2.2. Méthodes de contrôle centralisées pour le réglage secondaire

Dans [76], les auteurs proposent un système de contrôle centralisé qui coordonne les DGs d'un micro-réseau. Le contrôle utilise un algorithme prédictif qui accélère le temps de calcul pour les grands systèmes de puissance en optimisant séparément les problèmes de contrôle en régime permanent et en régime transitoire. Un système global de gestion de l'énergie est également mis en œuvre pour le micro-réseau pour coordonner le partage de puissance entre les différentes unités de production (DGs) pendant les opérations en mode connectées au réseau et en mode îloté. Les résultats de la simulation montrent que le système de contrôle proposé permet de coordonner efficacement les opérations des DGs du micro-réseau assurant ainsi un fonctionnement stable de l'ensemble. Les auteurs de [77] proposent un contrôle secondaire centralisé pour réaliser le partage de la puissance réactive tout en corrigeant les écarts de tension et de fréquence causés par le contrôle primaire. Le contrôle proposé est appliqué par l'ajout d'une boucle supplémentaire à l'algorithme du contrôle par statisme pour ajuster les puissances réactives fournies par les onduleurs et la tension du micro-réseau. La restauration de la fréquence du micro-réseau a été réalisée en ajoutant un terme correctif déterminé par le contrôleur central du micro-réseau qui s'ajoute à la référence de fréquence en sortie du contrôleur primaire.

1.3.2.3. Méthodes de contrôle distribuées pour le réglage secondaire

Les auteurs de [78] proposent une stratégie robuste de restauration de la fréquence et de la tension basée sur le consensus, ainsi qu'une autre stratégie de contrôle du partage de la puissance active, qui a été mise en œuvre dans un micro-réseau en appliquant la méthode de linéarisation par rétroaction. Par ailleurs, les auteurs de [79] ont traité efficacement les topologies de communication, les incertitudes paramétriques, la fonction "plug-and-play", les perturbations de la charge et les délais de communication. Le contrôle secondaire proposé permet la restauration de la tension et de la fréquence des DGs à leurs valeurs nominales. Pourtant, l'impact du contrôle secondaire sur le partage de la puissance réactive DGs n'a pas été étudié.

Dans [80], une méthodologie de commande distribuée pour le contrôle primaire et le contrôle secondaire dans les micro-réseaux îlotés est considérée. La stratégie est basée sur le consensus et considère un protocole appelé contrôleur **DAPI** ("Distributed-Averaging Proportional-Integral") pour restaurer la fréquence et la tension à la sortie de chaque DG et pour améliorer le partage de les puissances active et réactive consommées entre les DGs. Les contrôleurs DAPI permettent de réguler la fréquence tout en partageant la puissance active de manière proportionnelle. Ils peuvent également être réglés pour obtenir soit une régulation de la tension, soit un partage de la puissance réactive, ou bien un compromis entre les deux. Le contrôleur DAPI utilise un algorithme de consensus multi-agents pour distribuer l'action intégrale sur de nombreux dispositifs contrôlables. Le contrôleur a été proposé indépendamment dans [81], [82] comme un cadre basé sur le consensus pour partager la puissance entre les unités de production et éliminer les écarts de fréquence dans les micro-réseaux. Peu de temps après, le contrôleur a été utilisé dans l'optimisation distribuée [83] et testé expérimentalement pour le contrôle des micro-réseaux [84]. L'inconvénient du contrôle DAPI par rapport à l'algorithme de consensus est que le control DAPI exige un réseau de communication assurant les échanges d'information entre un DG et tous les autres DGs tandis qu'une communication uniquement entre les DGs voisin est nécessaire pour l'application du consensus. C'est pour cette raisons que nous avons utilisé une stratégie de commande à base de consensus au troisième chapitre de cette thèse, pour les contrôles primaires et secondaires distribués d'un micro-réseau maillé îloté.

Les auteurs de [85] proposent une méthode de contrôle secondaire distribuée en utilisant une technique dite "gossip-based" où les différentes DGs échangent des informations avec leurs DGs voisins, telles que les écarts entre les sorties de puissance programmées et réelles. Pour ramener la fréquence et la tension de chaque DG à leur valeurs nominales après une perturbation du système, les DGs calculent le décalage moyen pour l'ensemble du micro-réseau. Ce décalage moyen est ensuite ajouté aux références des contrôleurs de statisme des DGs pour compenser le décalage initial.

Les auteurs de [86] proposent un contrôle secondaire coopératif entièrement distribué pour la restauration de la fréquence et de la tension dans les micro-réseaux îlotés. La conception du contrôle proposé est adaptative, et basée sur le modèle dynamique des unités DG ainsi que sur les informations provenant des unités voisines, ce qui augmente la fiabilité du système, diminue sa sensibilité aux pannes et élimine le besoin d'une unité de traitement centrale. Les contrôleurs entièrement distribués rétablissent les amplitudes de la fréquence et de la tension des unités DG à leurs valeurs de référence, indépendamment des incertitudes paramétriques et des perturbations, tout en assurant un partage précis de la puissance active.

Dans [87], un contrôle secondaire de la tension et de la fréquence inspiré du contrôle coopératif distribué des systèmes multi-agents (MAS) est proposé. Le contrôle secondaire proposé est entièrement distribué et mis en œuvre par le biais d'un réseau de communication unidirectionnel. Ainsi, chaque générateur distribué n'a besoin que de ses propres informations et de celles de ses

voisins sur le graphe de communication. Par conséquent, les exigences d'un contrôleur central et d'un réseau de communication complexe sont supprimées, et la fiabilité du système est améliorée.

1.4. Conclusion

Les micro-réseaux sont capables d'intégrer différents systèmes de générateurs distribués (DG), convertissant différents types d'énergies renouvelables en énergie électrique, afin d'alimenter les différents types de charges qui y sont connectées. Cela leur confère un certain niveau d’autonomie, leur permettant d'être déconnectés du réseau principal la plupart du temps. L'un des défis consiste à synchroniser et à connecter tous les générateurs distribués à un micro-réseau îloté, tout en assurant la fonctionnalité "plug and play" et en respectant le partage de la puissance active et réactive entre les différentes unités de génération distribuées (DG).

Il existe trois niveaux principaux de contrôle pour gérer les micro-réseaux, à savoir le contrôle primaire, secondaire et tertiaire. À chaque niveau, le contrôle peut être mis en œuvre de manière centralisée, décentralisée et distribuée.

La stratégie de contrôle par statisme est largement utilisée pour la synchronisation et le partage des puissances des DGs, mais elle présente de nombreuses limitations telles que les variations de fréquence et de tension, réponse transitoire lente et le couplage des puissances dû aux déséquilibres d'impédance des lignes. Récemment, de nombreux chercheurs ont amélioré le contrôle conventionnel par statisme pour surmonter ces limitations. Cependant, la plupart des micro-réseaux considérés dans ces travaux de recherche ne possèdent qu'un seul point de couplage commun (mono-PCC), qui est connecté à tous les DG par l'intermédiaire des convertisseurs et des charges. Afin d'améliorer l'indépendance des micro-réseaux vis-à-vis du réseau principal par augmentation du taux de pénétration des générateurs distribués dans les micro-réseaux, le choix de micro-réseaux maillés multi-PCC semble être une bonne solution. Pour cette raison, dans le cadre des travaux menés dans cette thèse, nous avons considéré des micro-réseaux maillés multi-PCC intégrant plusieurs DGs et plusieurs charges pouvant être passives et/ou actives. Pour contrôler ces micro-réseaux maillés, nous avons développé deux approches de commande.

La première présentée au deuxième chapitre est un contrôle non linéaire basé aussi sur un contrôle par statisme modifié pour assurer l’équirépartition des puissances et la synchronisation des DG dans un micro-réseau maillé îloté ou connecté au réseau. Le contrôle proposé dans ce cas est distribué dans le sens où il utilise l'information sur la valeur de tension efficace mesurée au niveau d’un nœud pilote et envoyée à tous les DG du micro-réseau.

La deuxième présentée au chapitre 3 est une commande de statisme non linéaire distribuée basée sur un consensus pour un partage précis des puissances active et réactive ainsi que pour la restauration secondaire de la fréquence et de la tension des DGs d’un micro-réseau maillé îloté. Le contrôle proposé est basé sur une communication entre les contrôleurs locaux de chaque DG, ayant la possibilité d’échanger des informations avec uniquement les générateurs distribués (DG) voisins par un réseau de communication à faible débit.

Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

Chapitre 2 : Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

2.1. Introduction

Dans les micro-réseaux multi-PCC maillés, avec plusieurs sources de production distribuées (DG) et des charges connectées de manière aléatoire à différents PCC, les méthodes utilisées dans les micro-réseaux mono-PCC (par example le micro-réseau de la figure 2.1-a), à la fois pour la synchronisation et pour l'Equirépartition des puissances active et réactive, sont moins efficaces. En effet, la plupart des méthodes utilisée sont basées sur la commande de statisme ("Droop") et supposent que les lignes de transport sont purement inductives par nature, ce qui conduit à une caractéristique de "Droop" linéaire. Cependant, les lignes étant à la fois résistives et inductives, la commande des DGs des micro-réseaux par le Droop classiques conduit à une dépendance de la tension de sortie de chaque DG aussi bien à la puissance réactive qu'à la puissance active. De plus dans les micro-réseaux multi-PCC maillés, la modification de leurs topologies, chaque fois qu'une ligne, une charge ou une source est déconnectée, affectent le partage des puissances active et réactive consommée entre les DG, pouvant surcharger certains [88,89]. Un autre problème est la possibilité d'un comportement instable du micro-réseau dû à l'interaction entre les DG et les charges ainsi qu'aux changements dans la configuration du réseau. La stabilité du système dépend du type de charges connectées au micro-réseau, en particulier celles qui sont alimentées par des convertisseurs de puissance à régulation à large bande passante. Ces charges se comportent comme des charges à puissance constante (CPL) et peuvent provoquer l'instabilité du système [90, 91, 92]. Dans la littérature, les principales études de stabilité sont basées sur des techniques de linéarisation [93]. Les modèles non linéaires des systèmes électriques considérés sont linéarisés autour d'un point de fonctionnement puis étudiés à l'aide des outils d'analyse linéaire. De plus, les outils de linéarisation ne prédisent que la stabilité du système pour de petites perturbations [94,95] et ne peuvent pas garantir la stabilité du système pour de grandes perturbations.

Dans ce chapitre, un micro-réseau maillé contenant deux DGs (DG1 et DG2) et trois charges (LOAD1, LOAD2 et LOAD3) est considéré pour évaluer les différentes stratégies de commande proposées. Il est à noter que pour simplifier et clarifier les validations des méthodes proposées, des micro-réseaux à nombre de DGs plus élevé n'a pas été considéré dans un premier temps, même si ces méthodes restent valables pour les micro-réseaux à nombre de DGs plus élevé. Dans le micro-réseau maillé à 2 DGs considéré, les différents PCC sont interconnectés par des lignes d'alimentation, modélisées par des circuits RLC (résistance, inductance et capacité, modèle de type π) comme il est montré dans la Figure 2.1-b. Toutes les données du micro-réseau étudiés sont présentées dans les tableaux 1 et 2.

Dans un premier temps pour les micro-réseaux maillés fonctionnant en mode îloté, en section 2.2, une stratégie de contrôle de Droop non linéaire pour le partage précis des puissances active et réactive des DGs ainsi que leurs synchronisations au micro-réseau est proposée. Cette stratégie de contrôle est distribuée par le fait qu'elle utilise une seule information sur la mesure de la valeur efficace de la tension d'un nœud du micro-réseau considéré comme le nœud pilote (le nœud $\mu Gpcc$ sur la figure 2.1). Cette information est envoyée à partir du nœud pilote à tous les DGs, nécessitant une communication unidirectionnelle à faible vitesse. Cette nouvelle commande Droop non-linéaire consiste à supprimer le couplage entre la puissance active et réactive, causé par les impédances non négligeables des lignes et le changement dans la configuration du micro-réseau (modification de topologie suite à une ouverture ou connexion d'une ligne ou d'une charge). Le premier DG connecté au micro-réseau impose sa tension et sa fréquence. Pour les autres DGs, une stratégie de synchronisation adaptée est proposée et appliquée avant leur connexion au micro-réseau. Une approche adaptée pour le choix des paramètres du contrôleur non linéaire de chaque DG, utilisant uniquement les informations au niveau DG, n'ayant pas besoin du model complet du micro-réseau, est proposée. Cette approche est validée par la suite en utilisant le modèle global du micro-réseau intégrant les commandes des régulateurs de ses DGs. L'efficacité du contrôle non-linéaire proposé, pour la synchronisation et le partage de la puissance des DG, est vérifiée par des résultats de

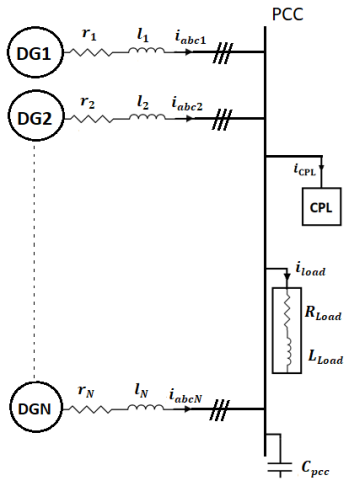
simulation à l'aide de MATLAB/SimPowerSystems pour les micro-réseaux maillés à 2 et 3 DGs et validée par des tests Hardware-In-Loop (HIL) utilisant les systèmes Dspace et opal-rt pour le micro-réseau maillé à 2 DG pour raison de disponibilité d'un nombre limité d'entrées et de sorties de dispositif utilisé.

Table 2.1 Paramètres des lignes électriques du micro-réseau considéré

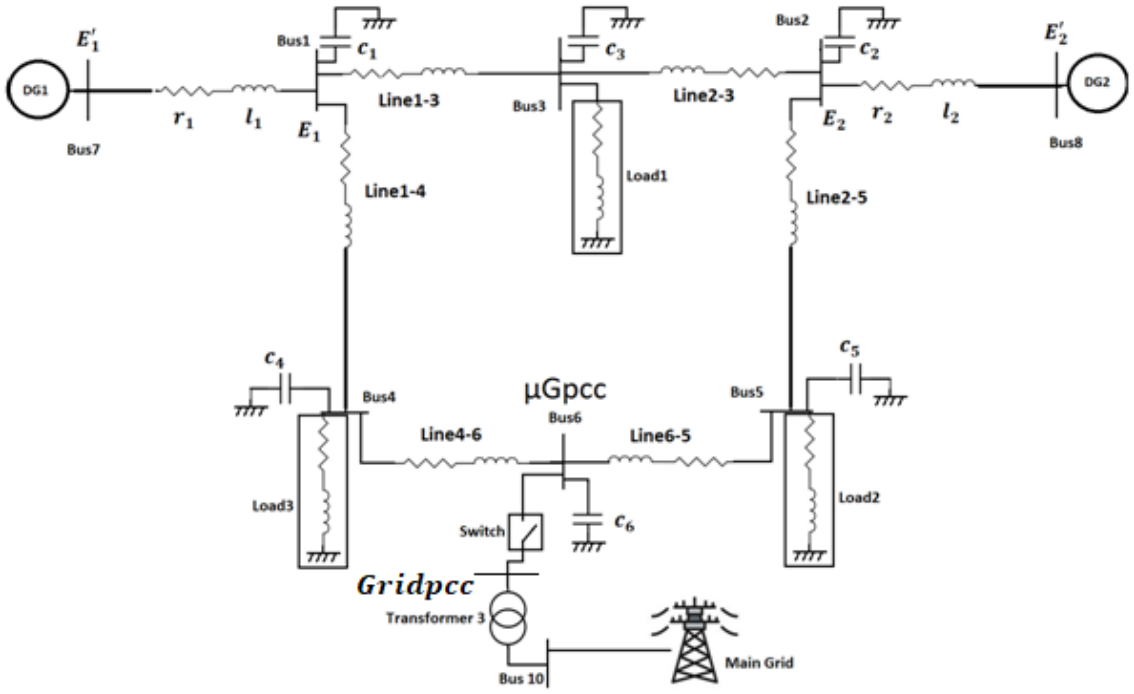
Lignes	Resistance (Ω)	Inductance (mH)	Capacitance (nF)	Points de connections
Line 1	0.01	1.14	50	DG1-Bus 1
Line 2	0.01	1.14	50	DG2- Bus 2
Line 1-3	0.629	7.14	50	Bus 1- Bus 3
Line 2-3	0.629	7.14	50	Bus 2- Bus 3
Line 1-4	0.629	8.5	50	Bus 1- Bus 4
Line 2-5	0.629	8.5	50	Bus 2- Bus 5
Line 4-6	0.659	8.7	50	Bus 4- Bus 6
Line 5-6	0.714	8.7	50	Bus 5- Bus 6

Table 2.2 Puissances des sources et des charges

Sources and Loads	Rated Active Power (kW)	Rated Reactive Power (kVAr)	Rated Phase to Phase Voltage (V)	Point Of connection
Source 1	14.5	5.3	400	Bus 1
Source 2	10	4	400	Bus 2
Source 3	7.5	6.3	400	Bus 6
Load 1	5	0.7	400	Bus 3
Load 2	4.5	0.9	400	Bus 5
Load 3	4	1	400	Bus 4
Load 4	7	5.8	400	Bus 3



(a)



(b)

Fig.2.1 (a) : Micro-réseau mono PCC. (b): Micro-réseau maillé

En utilisant les même utiles de simulation et de validation HIL, la robustesse du contrôle proposé est vérifiée par rapport à la variation de la charge et aux changements de topologie du micro-réseau. Les liaisons de communication unidirectionnelle utilisées envoient l'information du nœud pilote à tous les DGs du micro-réseau avec un certain délai. La stabilité du système et l'efficacité du contrôle proposé sont examinées et évaluées en fonction de ce délai [96]-[97]. Le délai maximal qui n'affecte pas la stabilité du micro-réseau est déterminé par des simulations MATLAB/SimPowerSystems. Comme nous le montre les résultats de l'étude effectuée, les délais qui n'affecte pas la stabilité de système ont des valeurs relativement importantes, ce qui autorise l'utilisation d'un système de communication à faible débit et donc peu contraignent et à faible coût.

Pour étudier la stabilité du micro-réseau, nous présentons ensuite en section 2.3 un modèle d'état de l'ensemble du micro-réseau maillé en considérant ses lignes électriques et ses charges ainsi que ses générateurs avec leurs contrôleurs intégrant leurs algorithmes de droop non-linéaire. La comparaison des résultats obtenus à partir du modèle d'état établi et du modèle développé dans l'environnement MATLAB/SimPowerSystems confirme la validité et la représentativité du modèle d'état proposé pour le micro-réseau considéré. Ce modèle d'état validé a été ensuite utilisé en section 2.4 pour étudier la stabilité du micro-réseau en calculant les valeurs propres de sa matrice Jacobéenne à chaque point de fonctionnement. L'analyse de la stabilité du système a ensuite été réalisée en observant l'évolution des valeurs propres du système pour différentes valeurs des paramètres de commande Droop, des impédances de lignes et de puissance des charges passives. Il sera démontré que la stabilité du système peut être affectée par des paramètres de contrôle de droop non adaptés. Afin de voir l'effet des charges à puissance constante (CPL) sur la stabilité du micro-réseau, une charge active se comportant comme une charge à puissance constante (CPL) est ajoutée ensuite au modèle de micro-réseau. En observant l'évolution des valeurs propres du nouveau système par rapport aux variations de CPL, il sera démontré que la stabilité du système peut être affectée en fonction de sa puissance active.

Chapitre 2 : Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

Après l'étude complète des micro-réseaux maillés en mode îloté, en section 2.5 le mode de fonctionnement connecté au réseau d'un micro-réseau maillé est étudié. La première partie de l'étude concerne la synchronisation du micro-réseau maillé et sa connexion sans à-coup en tant qu'unité au réseau principal sans affecter le partage de la puissance active et réactive entre les DGs. La deuxième partie de l'étude concerne le contrôle de la puissance active et réactive échangée avec le réseau principal, qui est l'un des défis du contrôle des micro-réseaux avec la synchronisation [98, 99, 100, 101]. Dans [98] et [99], les auteurs proposent une méthode centralisée de synchronisation du micro-réseau au réseau principal. Il s'agit d'ajouter la sortie d'un contrôleur secondaire centralisé de type PI au contrôleur Droop primaire de chaque DG du micro-réseau pour assurer une transition sans à-coup du mode de fonctionnement îloté au mode connecté au réseau sans affecter le partage de la puissance active des DGs. Cependant, les auteurs de [98] et [99] n'ont pas investigué les effets de l'approche de synchronisation centralisée sur le partage de la puissance réactive des DG du micro-réseau. En se basant sur les travaux mentionnés ci-dessus, la stratégie de contrôle non linéaire proposée en section 2.2, pour le partage de la puissance active et réactive des DG des micro-réseaux îlotés, est modifiée pour assurer la synchronisation et la connexion du micro-réseau au réseau principal. Pour cela nous avons ajouté aux contrôleurs primaires de Droop non-linéaire des termes intégraux permettant de synchroniser la tension du nœud pilote à celle du réseau avant leur connexion. Cette stratégie de contrôle secondaire, associée aux contrôleurs non-linéaires proposés, assure une connexion sans à-coup du micro-réseaux maillés par le nœud pilote au réseau, sans affecter le partage des puissances active et réactive entre ses DGs.

Après connexion au réseau, les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont contrôlées indépendamment en ajoutant la sortie d'un contrôleur tertiaire centralisé aux équations de Droop de chaque DG. La robustesse de cette stratégie de contrôle par rapport aux grandes variations des puissances des charges et aux modifications de la topologie du micro-réseau est également étudiée à la fin de ce chapitre.

2.2. Stratégies de contrôle de micro-réseaux maillés îlotés

Dans cette partie nous allons d'abord présenter les stratégies de contrôle à base de Droop, proposées dans la littérature et avérées efficace pour le partage des puissances active et réactive consommées par les charges entre les DGs de micro-réseaux mono-PCC et montrer qu'elles ne sont pas adaptées aux micro-réseaux maillés. Nous proposons alors une stratégie de contrôle à base de Droop non-linéaires, permettant d'assurer l'équirépartition active et réactives entre les DGs de micro-réseaux multi-PCC maillés. Il est à noter qu'une stratégie de synchronisation pour la connexion des DGs au micro-réseau qu'il soit mono-PCC ou multi-PCC maillé est nécessaire pour assurer la fonction "plug & play" des DGs sans les endommager sérieusement. Nous présentons en section 2.2.2 la stratégie proposée pour la synchronisation des DGs avant leurs connexions au micro-réseau.

2.2.1. Equirépartition des puissances à l'aide du contrôle Droop

La stratégie traditionnelle de droop imposant la pulsation électrique et la tension efficace d'un générateur distribué via les équations (2.1) et (2.2) peut être efficace dans les micro-réseaux mono-PCC (figure 2.1-a), uniquement si l'effet de l'impédance de la ligne électrique est ignoré [102]. Dans ces équations, P_{if} et Q_{if} sont les puissances active et réactive mesurées et filtrées du i^{ème} DG ($\mathrm{DG_i}$) à l'aide d'un filtre 1er ordre dont la pulsation de coupure est égale à ω_f (voir (2.3)). Les dynamiques de réponse des filtres utilisées imposent le temps nécessaire pour atteindre le régime établi suite à chaque perturbation des puissances active et réactive consommées par les charges du micro-réseau.

$$\omega_i = \omega_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{i}}(\mathrm{P}_{if} - \mathrm{P}_n) \tag{2.1}$$

$$E_{\mathrm{i}} = E_{\mathrm{n}} - n_{\mathrm{i}}(\mathrm{Q}_{if} - \mathrm{Q}_n) \tag{2.2}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} m_{\text{i}} = \frac{\Delta_\omega}{P_{in}} \\ n_{\text{i}} = \frac{\Delta_V}{Q_{in}} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \frac{d}{dt}P_{if} = \omega_f(P_i - P_{if}) \\ \frac{d}{dt}Q_{if} = \omega_f(Q_i - Q_{if}) \end{cases} \tag{2.3}$$

La commande de droop formalisée par les équations (2.1) et (2.2) ne garantit pas un partage efficace de la puissance réactive, même dans les micro-réseaux mono-PCC, en raison des impédances non négligeable des lignes. Une stratégie de commande de droop (appelée droop angle [103]), utilisant les équations en (2.4) s'est avérée efficace pour le partage de la puissance active et réactive dans les micro-réseaux mono-PCC. Cette stratégie de contrôle droop vise à imposer directement le module et l'argument de la tension au PCC auquel le i^{ème} DG (DG$_i$) est connecté (c'est-à-dire E_{iL} et δ_{iL})pour qu'elles deviennent égales aux valeurs nominales en régime établi (c'est-à-dire E_{in} et δ_{in}). En choisissant dans les équations en (2.4) $K_{ai} = K_a$ et $K_{ei} = K_e$ pour les différents DGs, on obtient un partage précis de la puissance active et réactive comme le montre la Figure 2.2, tiré de [103] où le DG1 forme le micro-réseau mono-PCC considéré à t=0s et le DG2 est connecté après synchronisation à t=4s.

$$\begin{cases} K_{ai}(\delta_{\text{in}} - \delta_{iL}) = m_i(P_{if} - P_{\text{in}}) \\ K_{ei}(E_{\text{in}} - E_{iL}) = n_i(Q_{if} - Q_{\text{in}}) \end{cases} \tag{2.4}$$

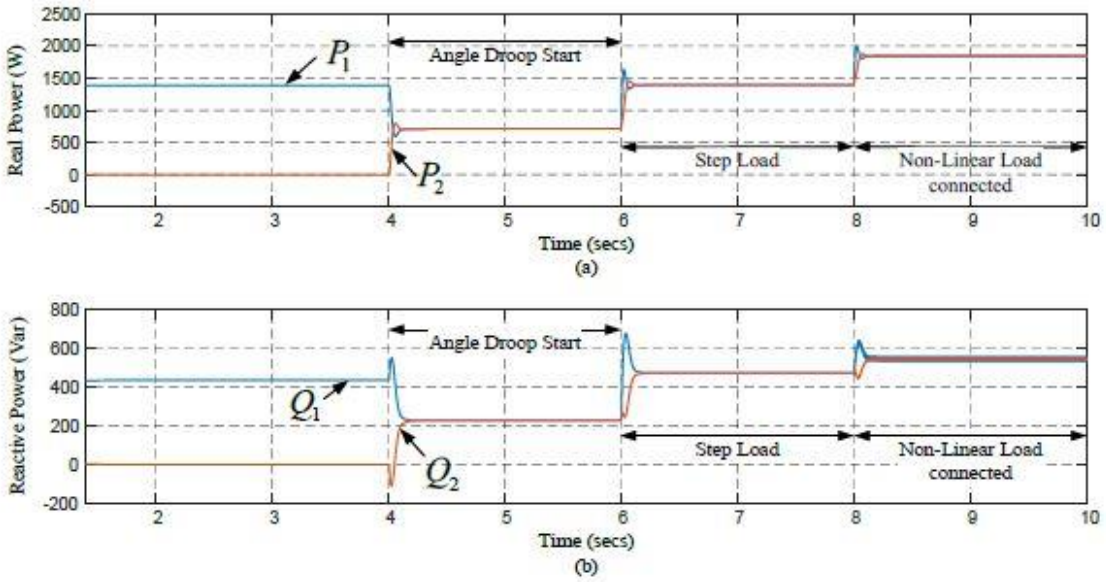


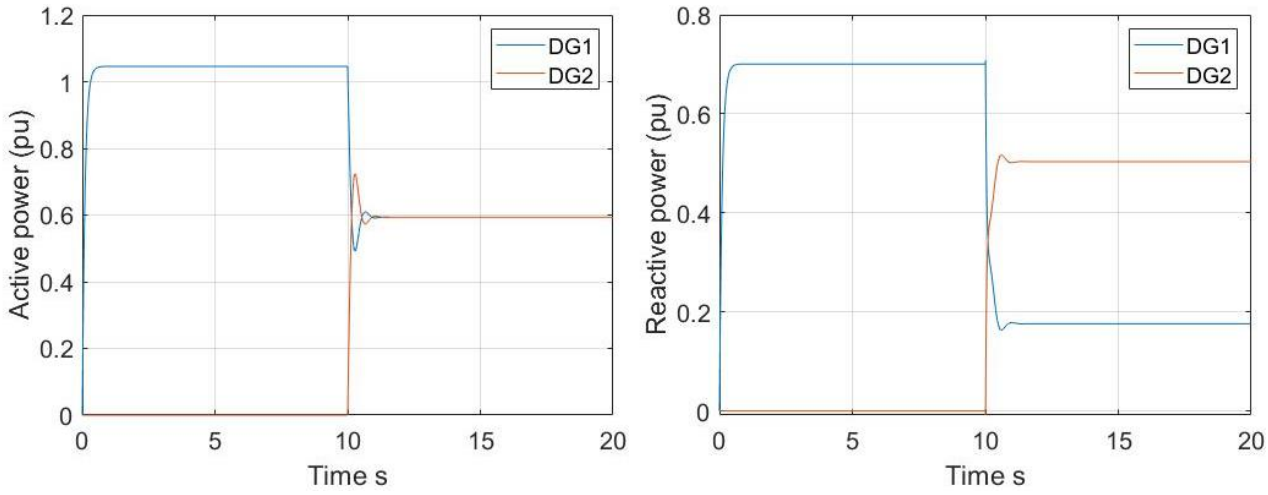
Fig.2.2 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DGs (tiré de [103])

En pratique, les micro-réseaux réels peuvent être maillés et avoir plusieurs PCC interconnectés par des lignes d'alimentation avec des impédances non négligeables. Afin d'étudier un tel micro-réseau, on considère le micro-réseau de la figure 2.1-b, composé de deux DGs et de trois charges, interconnectés par des lignes RLC (modélisation de type π). Pour montrer que l'application de la stratégie utilisant les équations en (2.4), proposée par [103], pour le contrôle des micro-réseaux maillés n'est pas efficace, nous la testons dans le cas du micro-réseau de la figure 2.1-b. En considérant le vecteur tension d'un nœud pilote (de module E_L et d'argument δ_L) comme potentiel de référence du micro-réseau maillé, nous formons ce micro-réseau par le DG1 à t=0s et nous connectons le DG2 à t=10s après sa synchronisation. Les résultats de simulation montrent que l'application de la méthode droop, basée sur les équations en (2.4), sur le micro-réseau multi-PCC de la figure 2.1-b conduit à un partage parfait de la puissance active (figure 2.3a) tandis que le partage de la puissance réactive n'est pas assuré (Figure 2.3b). Ce résultat pour les micro-réseaux maillés peut être expliqué par le fait que dans ce type de micro-réseaux, chaque ligne, reliant le i^{ème} PCC au

j[ième], possède une inductance ($\boldsymbol{\lambda_{i,j}}$) et une résistance ($\boldsymbol{\rho_{i,j}}$) non négligeables, conduisant à une chute de tension de ligne ($\Delta\boldsymbol{E_{i,j}}$) telle qu'exprimée dans l'équation (2.5) entre ces deux PCCs. Cette chute de tension est proportionnelle au courant de ligne ($\boldsymbol{I_{i,j}}$), ce qui crée un couplage entre la puissance active ($\boldsymbol{P_{i,j}}$) et la puissance réactive ($\boldsymbol{Q_{i,j}}$) échangées entre les i[ième] et j[ième] PCCs non pris en compte dans les équations en (2.4).

$$\Delta E_{i,j} = \rho_{i,j} \times I_{i,j} \times cos\,\varphi + \lambda_{i,j} \times \omega I_{i,j} \times sin\,\varphi = \frac{\rho_{i,j} \times P_{i,j} + \lambda_{i,j} \times Q_{i,j}}{E_j} \quad (2.5)$$

Où E_j est la valeur efficace de la tension du j[ème] PCC.



(a) (b)

Fig.2.3 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DGs **avec la méthode du Doop angulaire présenter aux (2.4)** (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (Simscape).

Afin d'assurer un partage efficace de la puissance active et réactive entre les DGs des micro-réseaux maillés multi-PCC îlotés, sans aucune connaissance de la structure du micro-réseau les équations du Droop classique du i[ème] DG (DG_i) sont modifiées. L'équation classique (2.6) de la fréquence reste inchangée, mais l'équation de tension de la commande Droop est modifiée comme exprimé dans (2.7) en ajoutant un terme de découplage non linéaire $\mathrm{J}_i \times (\mathrm{P}_{if} - \mathrm{P}_{in})$. Le terme J_i est exprimé dans (2.8) et dépend de la valeur de tension mesurée $\mathrm{E}_{\mu Gpcc}$ à l'un des PCC du micro-réseau maillé étudié et agissant comme son nœud pilote. Cette information mesurée sur la valeur efficace de la tension du nœud pilote est envoyée aux contrôleurs locaux des différents DGs. Dans notre cas, nous avons utilisé le PCC appelé $\mu Gpcc$ (figure 2.1-b), par lequel le micro-réseau considéré peut-être connecté au réseau principal. Quelles que soient les puissances consommées par les différentes charges du micro-réseau, le terme non linéaire $\mathrm{J}_i \times (\mathrm{P}_{if} - \mathrm{P}_{in})$ permet de supprimer le couplage physique entre les puissances active et réactive, causé par la chute de tension due aux inductances et résistances des lignes électriques. L'estimation de J_i est réalisée à l'aide d'un simple contrôleur intégral, forçant une erreur ε_i définie dans (2.8) à zéro. Comme nous verrons en section 2.2.3, après avoir pré-dimensionner les paramètres de la commande Droop non-linéaire proposée et présenter la stratégie de synchronisation pour les DGs des micro-réseaux maillés, un partage précis de la puissance réactive est obtenu entre les DGs quel que soit le point de fonctionnement et les puissances actives et réactives demandées par les charges en régime permanent.

$$\omega_i = \omega_{\mathrm{n}} - \mathrm{m}_i(\mathrm{P}_{if} - \mathrm{P}_{in}) \quad (2.6)$$

$$E_i = E_{\mathrm{n}} - \mathrm{n}_i\left(\mathrm{Q}_{if} - \mathrm{Q}_{in}\right) - \mathrm{J}_i \times (\mathrm{P}_{if} - \mathrm{P}_{in}) \quad (2.7)$$

$$\text{Avec:}\begin{cases} \mathrm{J}_i = \mathrm{K}_i \int \varepsilon_i dt \\ \varepsilon_i = \left[-\alpha\left(\frac{\mathrm{E}_{\mu Gpcc}}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{\mathrm{Q}_{if}}{\mathrm{Q}_{in}} - 1\right)\right] \\ \mathrm{m}_i = \frac{\Delta_\omega}{P_{in}} \\ \mathrm{n}_i = \frac{\Delta_E}{Q_{in}} \end{cases} \quad (2.8)$$

En cas d'absence d'information sur la tension $\mathrm{E}_{\mu Gpcc}$ du nœud pilote, le coefficient J_i est fixé à 0 et nous revenons au droop classique, ce qui conduit un partage non précis de la réactives entre les DGs.

Prédimensionnement des paramètres α et K_i des contrôleurs non linéaires pour le contrôle primaire :

Le réglage Droop primaire de la puissance réactive (relation (2.7)) comporte trois paramètres à savoir la pulsation de coupure ω_f du filtre (voir (2.3)), le gain proportionnel α et le gain intégral K_i (voir (2.8)). L'objectif est de proposer une méthode de dimensionnement robuste décentralisée qui ne dépend que des données accessibles localement et qui ne nécessite pas la connaissance de l'intégralité des paramètres des lignes du micro-réseau, des charges et des sources (DGs) qui y sont connectées. La méthodologie présentée ci-après pour la détermination de $\mathbf{K}_i$ *et* $\boldsymbol{\omega_f}$ se base sur un modèle simplifié dont les paramètres et les données nécessaires sont localement accessibles. Une vérification par la simulation numérique est possible en utilisant les paramètres de la commande Droop déterminés par la méthodologie proposée, mais nous validerons *a posteriori* cette méthodologie de manière plus théorique en se basant sur un modèle validé du micro-réseaux présenté en section 2.4. Ce dimensionnement s'effectue en plusieurs étapes.

- **Conception de α**

La valeur de α permet de lier dans (2.9) la variation relative de la tension admissible au nœud pilote avec la variation relative de la puissance réactive fournie par le générateur en régime établi. Posons ΔQ, $\Delta\mathrm{E}_{\mu Gpcc}$ respectivement les variations normalisées admissibles de la puissance réactive et de la tension du micro-réseau identiques pour tous les DG. Alors, en régime permanent et sur la base de l'équation (2.8), on a l'équation (2.9) :

$$-\alpha\left(\frac{\mathrm{E}_{\mu Gpcc}}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{\mathrm{Q}_{if}}{\mathrm{Q}_{in}} - 1\right) = 0 \quad (2.9)$$

En admettant $\Delta Q = \left(1 - \frac{\mathrm{Q}_{if}}{\mathrm{Q}_{in}}\right)$ et $\Delta\mathrm{E}_{\mu Gpcc} = \left(\frac{\mathrm{E}_{\mu Gpcc}}{E_n} - 1\right)$, l'équation (2.9) peut être écrit comme indiqué dans (2.10) :

$$\frac{Q_{in} - \Delta Q \times Q_{in}}{Q_{in}} - 1 = -\alpha \times \left(\frac{E_n(1 + \Delta\mathrm{E}_{\mu Gpcc})}{E_n} - 1\right) \quad (2.10)$$

Ce qui nous donne la relation (2.11) :

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{\Delta\mathrm{E}_{\mu Gpcc}} \quad (2.11)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} E_n = 230\,V \\ \Delta\mathrm{E}_{\mu Gpcc} = 0.0043 \\ \Delta Q = 0.2 \end{cases} \quad \rightarrow \quad \alpha = 46$$

- **Conception des paramètres $\mathbf{K}_i$ *et* $\boldsymbol{\omega_f}$ en se basant sur un modèle simplifié :**

L'objectif étant de garantir une équipartition des puissances réactives entre générateurs distribués, il est impératif de faire apparaitre au moins deux générateurs distribués dans le modèle simplifié. Le DG1 sera supposé être le dispositif à étudier et nous proposons donc de modéliser l'ensemble des

autres générateurs du micro-réseau comme un générateur unique supposé équivalent DG_{eq} connecté au PCC par une impédance de ligne supposée équivalente (paramètres r_{eq}, l_{eq}). Cela conduit à considérer le schéma équivalent proposé sur la figure 2.4. Les dynamiques internes des DGs sont négligées. La tension au PCC est supposée constante, égale à la tension nominale et le vecteur tension au PCC ($\vec{E}_{pcc}$) sera prise comme référence de phase. Dans le repère dq choisi, le vecteur tension sera entièrement porté par l'axe *d* ($E_{pccd} = |\vec{E}_{pcc}|$) et sa composante suivant l'axe *q* sera supposée nulle ($E_{pccq} = 0$) à tout instant. L'ensemble des charges sera ramené au PCC, et inclura une charge à puissance active P_{eq} et réactive Q_{eq} constantes ainsi qu'une charge résistive.

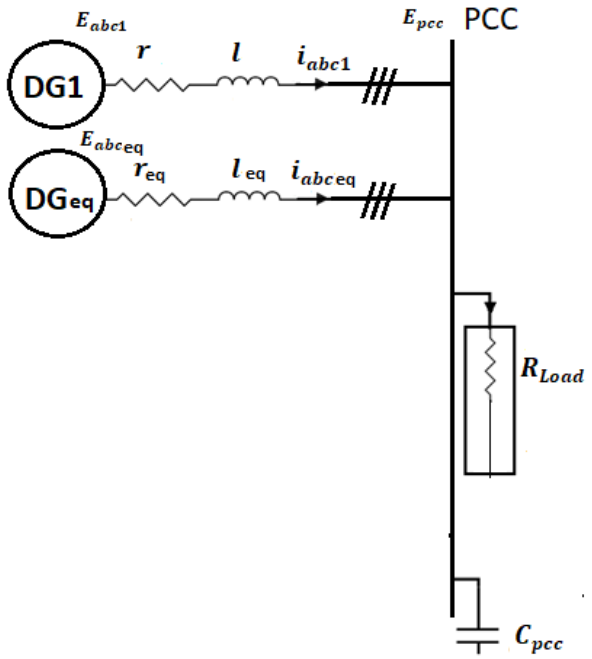


Fig.2.4 Modèle simplifié du micro-réseau

Les équations d'état du modèle simplifié sont présentées comme suit :

- Les tensions imposées par les générateurs dans le référentiel tournant lié au PCC s'écrivent :

DG1: $\begin{pmatrix} E_{1_d} \\ E_{1_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_1.\cos\xi_1 \\ \sqrt{3}.E_1.\sin\xi_1 \end{pmatrix}$

DGeq : $\begin{pmatrix} E_{eq_d} \\ E_{eq_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_{eq}.\cos(\xi_{eq}) \\ \sqrt{3}.E_{eq}.\sin(\xi_{eq}) \end{pmatrix}$

Les tensions E_1 E_{eq} et les angles ξ_1 ξ_{eq} sont imposés par les équations du statisme (voir ci-dessous)

- Les équations des lignes:

$$\begin{cases} \frac{di_{1_d}}{dt} = \frac{1}{l}\left(-ri_{1_d} + E_{1_d} - E_{pccd} + l\omega i_{1_q}\right) \\ \frac{di_{1_q}}{dt} = \frac{1}{l}(-ri_{1_q} + E_{1_q} - E_{pccq} - l\omega i_{1_d}) \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{eq_d}}{dt} = \frac{1}{l_{eq}}\left(-r_{eq}i_{eq_d} + E_{eq_d} - E_{pccd} + l_{eq}\omega i_{eq_q}\right) \\ \frac{di_{eq_q}}{dt} = \frac{1}{l_{eq}}(-r_{eq}i_{eq_q} + E_{eq_q} - E_{pccq} - l_{eq}\omega i_{eq_d}) \end{cases} \quad (2.13)$$

- La tension au PCC s'obtient par intégration de l'équations suivante :

$$\begin{cases} \dfrac{dE_{pccd}}{dt} = \dfrac{1}{c_{pcc}}\left(i_{1_d} + i_{eq_d} - \dfrac{E_{pccd}}{R_{charge}} - i_{Ld} + c_{pcc}\omega E_{pccq}\right) \\ E_{pccq} = 0 \end{cases}$$

Avec $i_{Ld} = \frac{P_{eq}}{E_{pccd}}$, $i_{Lq} = -\frac{Q_{eq}}{E_{pccd}}$

- Calcul des puissances actives et réactives injectées par le DG1 et le DGeq :

$$\begin{cases} P_1 = E_{1_d} i_{1_d} + E_{1_q} i_{1_q} \\ P_2 = E_{eq_d} i_{eq_d} + E_{eq_q} i_{eq_q} \\ Q_1 = E_{1_q} i_{1_d} - E_{1_d} i_{1_q} \\ Q_2 = E_{eq_q} i_{eq_d} - E_{eq_d} i_{eq_q} \end{cases}$$

- Equations liées aux statismes des DG1 et DGeq :

L'effet du filtrage des mesures des puissances active et réactive de chaque DG est modélisé par un filtre ramené en sortie de statisme (cette approximation induit une petite erreur de modélisation suite la non linéarité introduite dans le calcul du gain intégral). On suppose alors que la pulsation électrique ω_i et la tension E_{i} de chaque DG (VSI formant le réseau), vérifient les équations différentielles pour $i \in \{1,2\}$:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \omega_f\left(-\omega_i + \omega_n - \frac{\Delta_\omega}{P_{in}}(\mathrm{P}_i - \mathrm{P}_{in})\right) \quad (2.14)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \omega_f(-E_i + E_n - \frac{\Delta_E}{Q_{in}}(\mathrm{Q}_i - \mathrm{Q}_{in}) - \mathrm{J}_i(\mathrm{P}_i - \mathrm{P}_{in}))) \quad (2.15)$$

$$\frac{d\mathrm{J}_i}{dt} = \mathrm{K}_i \times \left[-\alpha\left(\frac{\mathrm{E}_{pcc}}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{\mathrm{Q}_i}{\mathrm{Q}_{in}} - 1\right)\right] \quad (2.16)$$

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \quad (2.17)$$

ω_0 Représente la pulsation du réseau en régime permanent qui est proche mais pas égale à la pulsation nominale ω_n. L'ensemble des équations précédentes permet de définir un modèle dynamique équivalent d'ordre 13 permettant d'analyser la stabilité du système en fonction des paramètres de commande du contrôle droop. Le vecteur d'état considéré s'écrit alors :

x= [i_{1_d}; i_{1_q}; i_{eq_d}; i_{eq_q}; E_{pcc_d}; E_{1_d}; E_{1_q}; E_{eq_d}; E_{eq_q}; J_1; J_2; ξ_1; ξ_2]

Les équations dynamiques (2.12 à 2.17) peuvent se mettre sous la forme vectorielle $\dot{x} = F(x)$. L'évaluation des valeurs propres au point d'équilibre permet d'analyser la stabilité locale asymptotique du système. Un tracé des valeurs propres du système simplifié de la figure 2.4 lorsque la pulsation ω_f est fixée 20 rad.s^{-1} et pour différentes valeurs de Ki (0.0033 < K_i <0.033) est présentée sur la figure 2.5. Pour la suite de l'étude, la valeur choisie de K_i permet d'assurer que la dynamique du réglage primaire reste bien inférieure à la dynamique des boucles de tension des générateurs (fixée à 100 rad.s^{-1}). On choisit donc une valeur de Ki = 0.0033 pour laquelle les pôles fonctions de Ki ont une partie réelle autour de -10 rad.s^{-1}.

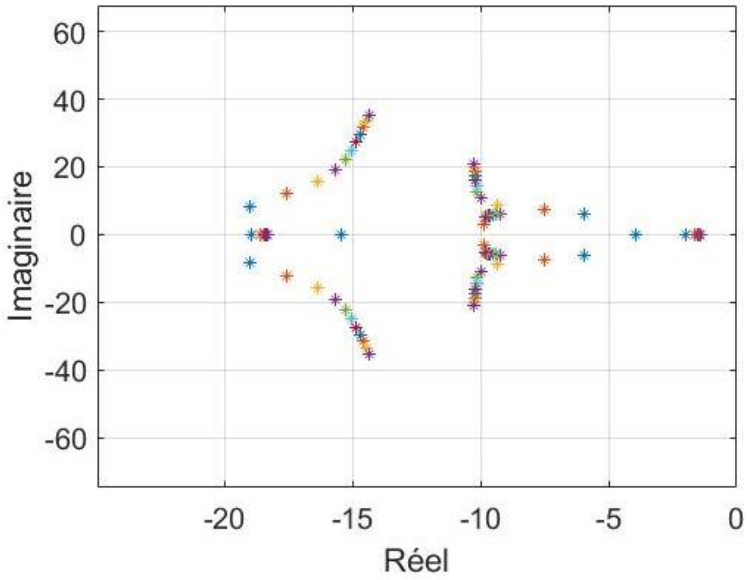


Fig.2.5 Tracé des pôles du modèle simplifié lorsque Ki varie de0.0033 à 0.033, ω_f=20 rad.s^{-1}, Pg=19450 watts, Qg= 4190 var, Rload= 8.1594 Ω, leq=0.35 mH ,req=0.0315 Ω ,l=0.7 mH ,r=0.0629 Ω ,Cpcc= 10e-9 F.

Comme nous avons mentionné plus haut, ces résultats seront comparés à ceux obtenus avec un modèle complet du réseau qui sera détaillé dans la section 2.4.2.

2.2.2. Stratégie de synchronisation dans un micro-réseau maillé îloté.

En raison de la complexité des micro-réseaux maillés et de l'intermittence des énergies renouvelables, les DGs se connectent et se déconnectent fréquemment du micro-réseau. Une méthode de synchronisation rapide et efficace est donc nécessaire. Afin de réaliser une synchronisation rapide et efficace du i^{ème} DG au i^{ème} PCC du micro-réseau maillé considéré, leurs vecteurs tension ($\overline{E_i} = E_i e^{j\delta_i}$ et $\overline{E_{pcci}} = E_{pcci} e^{j\delta_{pcci}}$) doivent être suffisamment proches en module ($E_i \approx E_{pcci}$) et en argument ($\delta_i \approx \delta_{pcci}$). Ceci est réalisé en ajoutant les termes intégraux $S1_i$ et $S2_i$ aux équations de commande Droop du i^{èmes} DG comme indiqué dans (2.18) et (2.19). Ces termes ($S1_i$ et $S2_i$) sont activés par un coefficient binaire appelé B_i, qui est égal à 1 uniquement pendant l'intervalle de synchronisation et est mis à zéro en dehors de cet intervalle. Il convient de noter que la procédure de synchronisation est présentée à la figure 2.6.

$$\omega_i = \omega_n - m_i(P_{if} - P_{in}) - S1_i . B_i \quad (2.18)$$

$$E_i = E_n - n_i(Q_{if} - Q_{in}) + J_i(P_{if} - P_{in}) - S2_i . B_i \quad (2.19)$$

Avec : $\begin{cases} S1_i = K_{bi} \int (\delta_i - \delta_{pcci}) \\ S2_i = K_{ei} \int (E_i - E_{pcci}) \end{cases}$

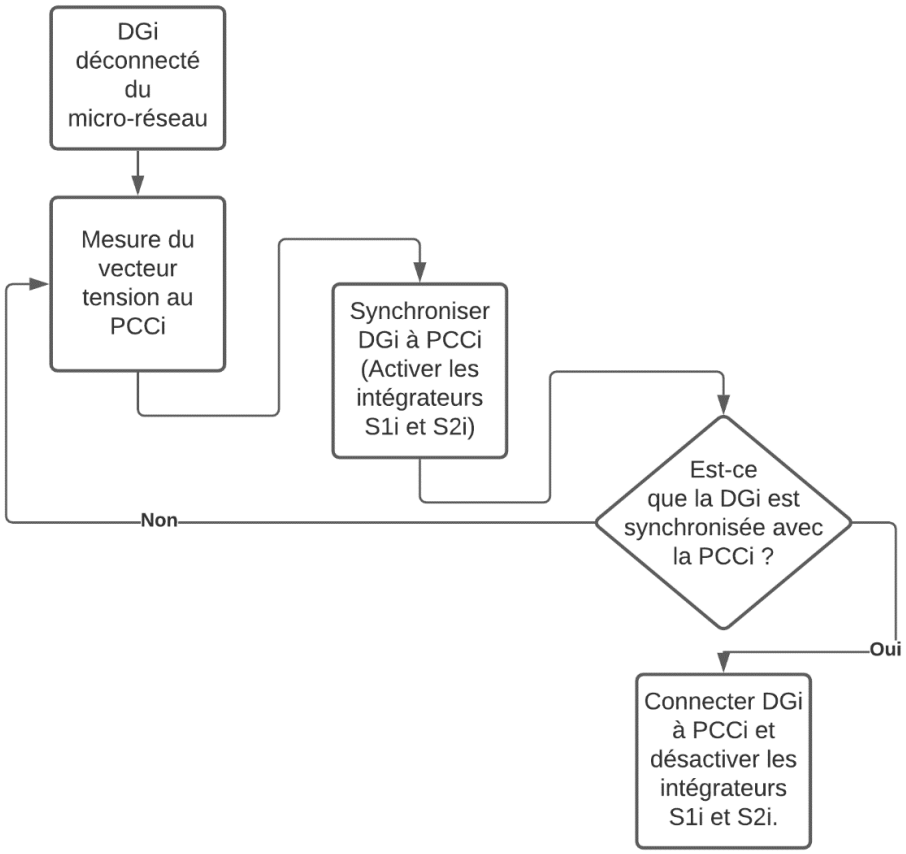


Fig.2.6 Procédure de synchronisation des DG

2.2.3. Première validation par simulation des stratégies de commande non-linéaire proposée dans les micro-réseaux maillés îlotés.

Afin de montrer l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée pour la synchronisation et le partage de puissance, le micro-réseau maillé de la figure 2.7 est considéré. Pour les simulations effectuées, les paramètres principaux du micro-réseau sont listés dans le tableau 2.1 et les puissances nominales (ou disponible) des DGs et des charges sont listées dans le tableau 2.2. Les simulations sont réalisées à l'aide de la boîte à outils Simscape de Matlab/Simulink. La source 1 (DG1) et la source 2 (DG2) sont modélisées par une source de tension triphasée contrôlée en utilisant sa tension triphasée de référence E_{abcref_i} comme présenté dans la figure 2.8. Comme le montre la figure 2.7, DG1 et DG2 sont connectés respectivement à PCC1 et PCC2. Le schéma synoptique décrivant un DGi à commande droop non-linéaire proposée est présenté à la Figure 2.9. La référence de tension E_{abcref_i} du i^{ème} DG, est d'abord calculée à partir des vecteurs tension et courant mesurés à la sortie du i^{ème} DG (E_{abc_i} et I_{abc_i}). Pour cela, les composantes des vecteurs tension et courant (E_{dq_i} et I_{dq_i}) sont déterminées en appliquant la transformation Park, constituée du produit de la transformation de Concordia $\boldsymbol{T_{32}^t}$ et d'une matrice de rotation $P(-\delta_i)$, comme exprimé dans (2.20). Il faut noter que δ_i qui est l'argument du vecteur tension $\overline{E_i}$ imposé par le i^{ème} DG à son pont de connexion (PCCi), obtenu par la relation (2.21) en intégrant la pulsation ω_i exprimée dans (2.18). Ces vecteurs (E_{dq_i} et I_{dq_i}) sont utilisés pour calculer les puissances actives et réactives P_i et Q_i délivrées par le i^{ème} DG comme exprimé dans (2.22). La dynamique du contrôle droop du i^{ème} DG est prise en compte en ajoutant un

bloc de filtre 1er ordre en cascade avec le bloc de calcul de puissance (Figure 2.9, équation (2.23)). Les puissances actives et réactives filtrées (P_{if} et Q_{if}) ainsi obtenues sont ensuite utilisées dans le calcul du module E_i et de l'argument δ_i du vecteur tension $\overline{E_i} = E_i e^{j\delta_i}$ en s'appuyant sur les équations (2.18) et (2.19) de la commande droop proposée et l'équation (2.20). Le réglage des paramètres de Droop primaire, à savoir la pulsation de coupure ω_f du filtre (voir (2.23)), le gain proportionnel α et le gain intégral K_i (voir (2.8)), est effectué en utilisant la méthodologie de prédimensionnement proposé à la fin de section 2.2.1.

Sur la base de ce modèle Simscape, l'efficacité des stratégies de synchronisation et de partage des puissances proposées, présentées dans les équations (2.9) et (2.10), est évaluée. Les figures 2.10a et 2.10b montrent l'évolution des puissances active et réactive fournies par les DG1 et DG2. Au début, le premier DG (DG1) forme le micro-réseau en imposant sa fréquence ainsi que sa tension. Le deuxième générateur (DG2) est synchronisé pendant l'intervalle 9-10, puis il est connecté au micro-réseau à t = 10 s. Le contrôleur droop non-linéaire proposé permet ainsi un partage précis des puissances active et réactive en régime permanent sans être affecté par la procédure de synchronisation. En outre, la connexion du DG2 au micro-réseau après sa synchronisation se fait de manière contrôlée et sans à-coup, comme le montre le régime transitoire après t=10 s.

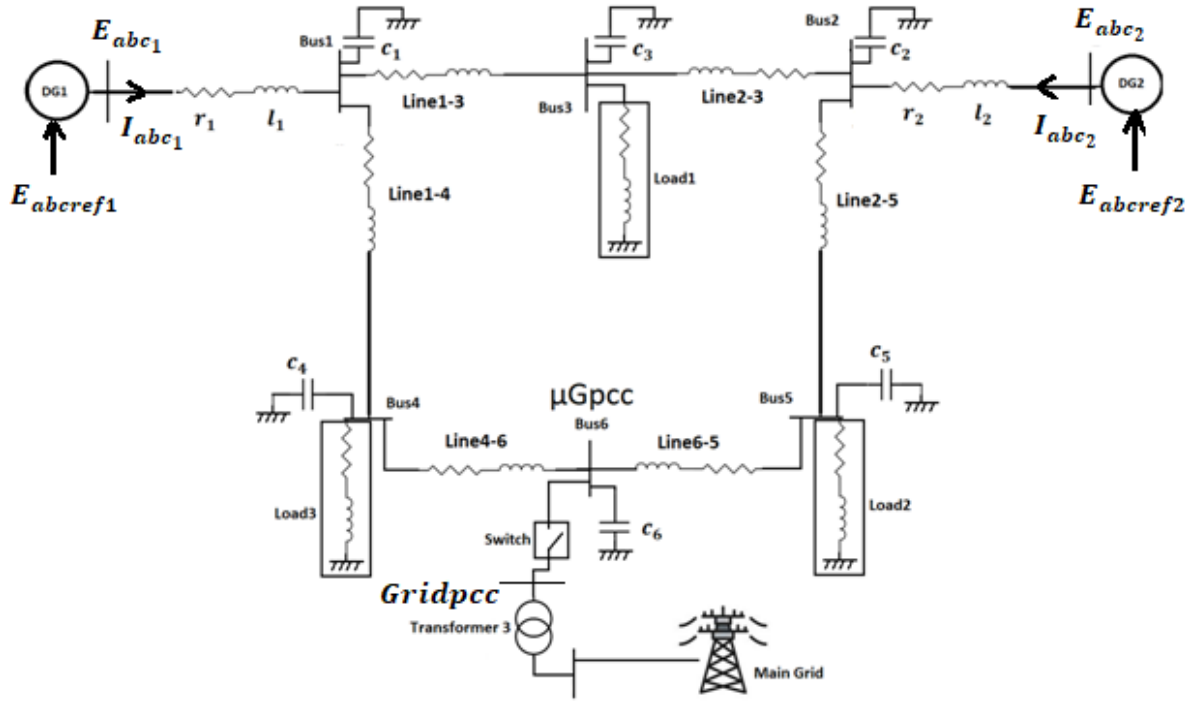


Fig.2.7 Micro-réseau maillé pour simulation

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} i_{i_d} \\ i_{i_q} \end{pmatrix} = P(-\delta_i).\boldsymbol{T_{32}^t} \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} = P(-\delta_i).\boldsymbol{T_{32}^t} \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ -i_{ia} - i_{ib} \end{bmatrix} \\ \begin{pmatrix} E_{i_d} \\ E_{i_q} \end{pmatrix} = P(-\delta_i).\boldsymbol{T_{32}^t} \begin{bmatrix} E_{ia} \\ E_{ib} \\ E_{ic} \end{bmatrix} = P(-\delta_i).\boldsymbol{T_{32}^t} \begin{bmatrix} E_{iac} \\ E_{ibc} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{T_{32}^t} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad P(\delta_i) = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & -\sin\delta_i \\ \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \end{cases} \tag{2.20}$$

$$\delta_i = \int \omega_i \, . \, dt \tag{2.21}$$

$$\begin{cases} P_i = E_{i_d} . i_{i_d} + E_{i_q} . i_{i_q} \\ Q_i = E_{i_q} . \ i_{i_d} - E_{i_d} . i_{i_q} \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_{if} = \omega_f (P_i - P_{if}) \\ \frac{d}{dt} Q_{if} = \omega_f (Q_i - Q_{if}) \end{cases} \quad (2.23)$$

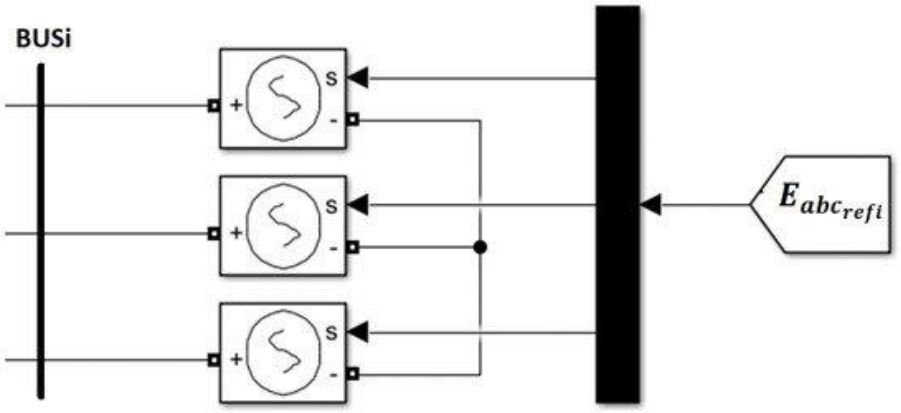


Fig.2.8 Source de tension contrôlable

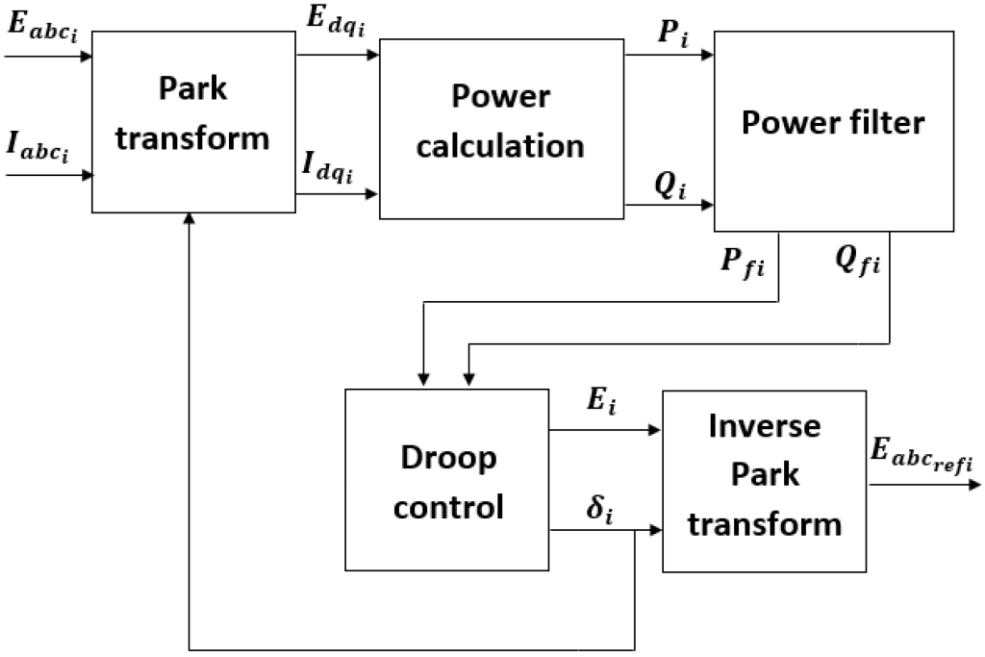
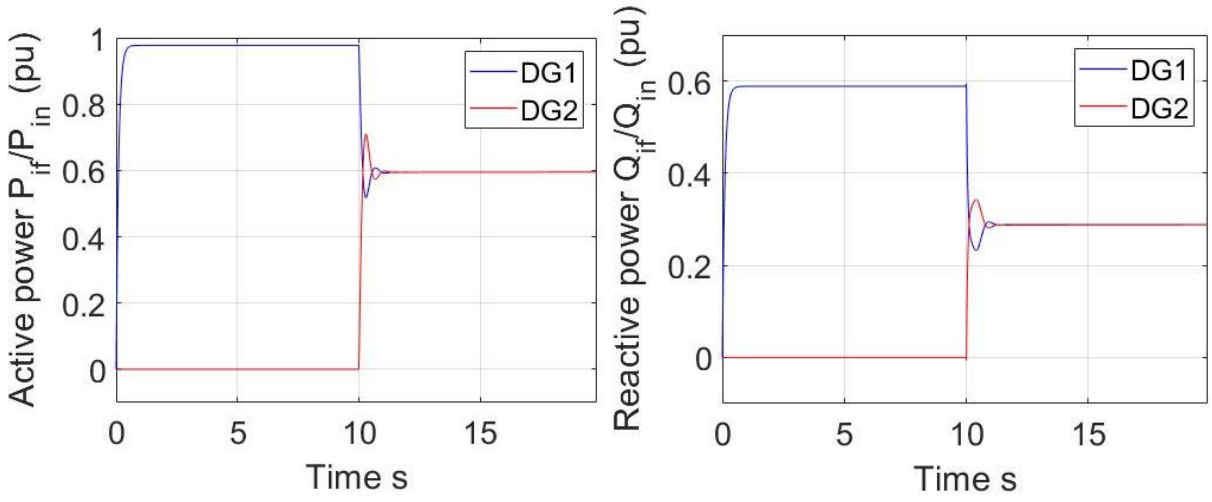


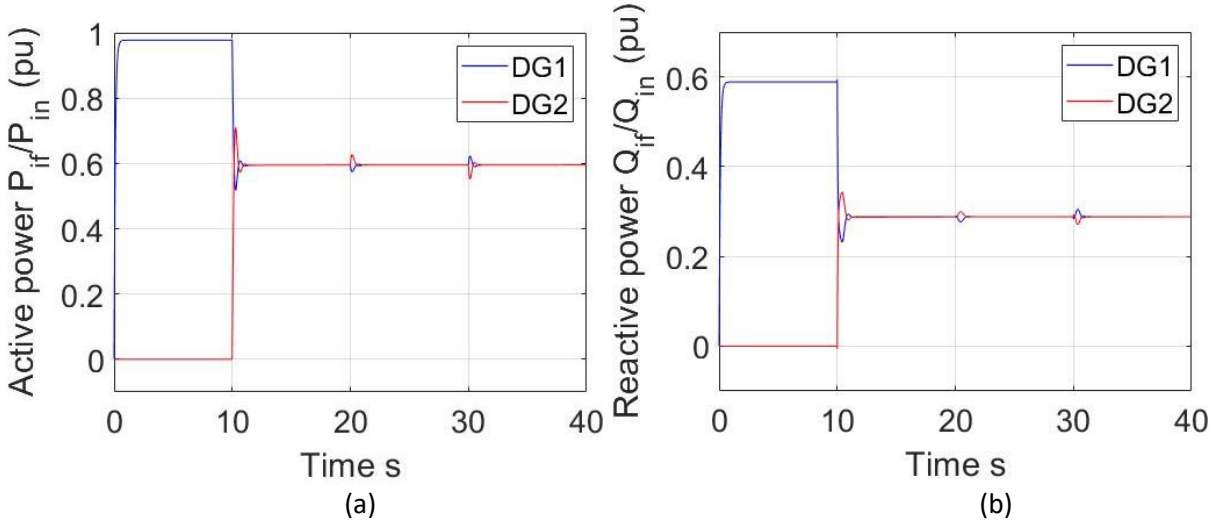
Fig.2.9 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DG à commande droop dans Simscape



(a) (b)

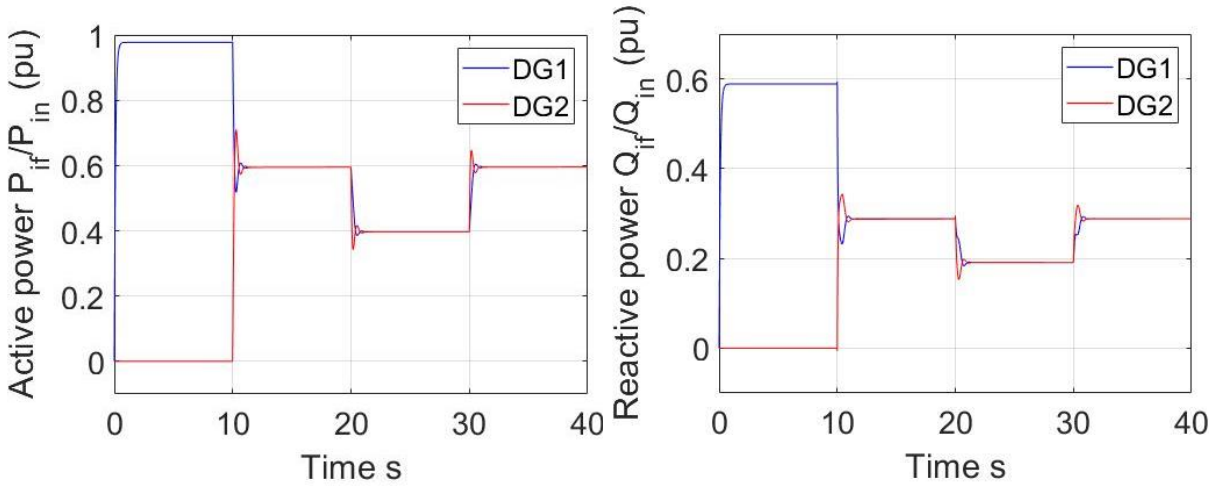
Fig.2.10 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (Simscape).

Afin de tester et de valider la robustesse du contrôle Droop non-linéaire proposé par rapport aux modifications de la topologie du micro-réseau maillé considéré (la figure 2.7, une ligne électrique) est déconnectée puis reconnectée. Les figures 2.11a et 2.11b montrent respectivement les évolutions des puissances actives et réactives des DG1 et DG2 après la déconnexion de la ligne 2-5 (figure 2.7) à t=20s et après sa reconnexion à t=30s. On peut remarquer le partage des puissances active et réactive entre les DGs est maintenu après la déconnexion et la reconnexion d'une ligne électrique. Ces résultats montrent la robustesse de la commande Droop non-linéaire vis-à-vis de changement de topologie du micro-réseau maillé. De même, pour valider la robustesse du contrôle par rapport aux grandes variations de puissance des charges, après la connexion du DG2 à 10 s, la charge 2 de la figure 2.7 est déconnectée à t = 20 s puis reconnectée à t = 30 s. On peut remarquer sur les figures 2.12a 2.12b que le partage de la puissance active et réactive reste efficace même après la déconnexion et la reconnexion d'une charge de puissance élevée, ce qui montre également la robustesse de la commande Droop non-linéaire vis-à-vis de variation brusque des charges.



(a) (b)

Fig.2.11 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s, la 2-5 est déconnectée à t = 20 s et reconnectée à t = 30 s) (changement de topologie Simscape).



(a) (b)

Fig.2.12 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s, la charge 3 est déconnectée à t = 20 s et reconnectée à t = 30 s) (variation de charge Simscape).

Afin de montrer l'efficacité et la robustesse de la stratégie de contrôle proposée pour la synchronisation et le partage des puissances dans les micro-réseaux maillés à plus de deux DGs. Pour tester un micro-réseau à 3-DGs, nous admettons qu'un 3ème DG (DG3) peut se connecter au nœud $\mu Gpcc$ du miro-réseau de la figure 2.7. On obtient ainsi le micro-réseau maillé de la figure 2.13 à 3 DGs. Etant donné que la puissance disponible du micro-réseau à 3 DGs est plus élevée, une quatrième charge (load4) peut se connecter au nœud appelé Bus3 (voir figure 2.13). Les simulations sont réalisées à l'aide de la boîte à outils Simscape de Matlab/Simulink.

Pour les simulations effectuées, les paramètres principaux du micro-réseau sont listés dans le tableau 2.1 et les puissances nominales (ou disponible) des DGs et des charges sont listées dans le tableau 2.2. Les résultats de simulation concernant l'évolution des puissances actives et réactives des DGs sous différentes conditions sont respectivement présentés dans les figures 2.14a et 2.14b. En appliquant la commande non-linéaire proposée dans (2.18) et (2.19), le DG1 forme d'abord le micro-réseau en imposant sa fréquence et sa tension, ce qui permet d'alimenter les charges 1, 2 et 3 qui sont déjà connectées au micro-réseau. Le DG2 est synchronisé pendant l'intervalle 4 s à 5 s, puis il est connecté au micro-réseau à t = 5 s. Le DG3 est synchronisé pendant l'intervalle 9 s à 10 s, et il est connecté au micro-réseau à t = 10 s. Pour vérifier la robustesse de la méthode de contrôle proposée par rapport aux variations de charge, à t=15 s la charge 4 est connectée au micro-réseau puis déconnectée à t=20 s. Enfin, pour voir la robustesse du contrôle par rapport aux changements de topologie, la ligne 2-5 de la figure 2.13 est déconnectée à t=25 s et reconnectée à t=30 s. Les résultats de simulation présentés dans les figures 2.14a et 2.14b montrent l'efficacité de la commande non-linéaire proposée pour assurer un partage précis des puissances active et réactive dans un micro-réseau maillé îloté à plus de deux DGs. Ces résultats confirment également que la stratégie de contrôle proposée autorise la connexion (synchronisation) sans à-coup des DGs au micro-réseau, ce qui garantit la fonction « plug and play » pour les DGs.

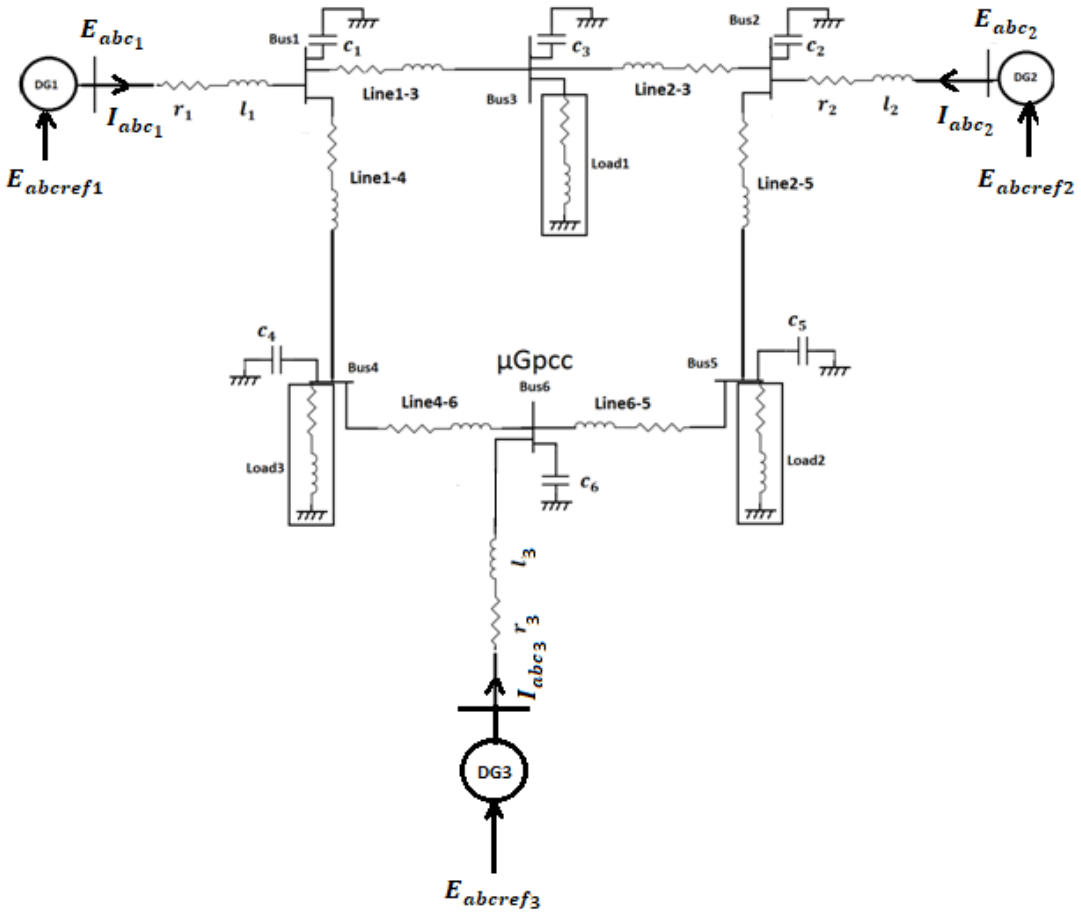
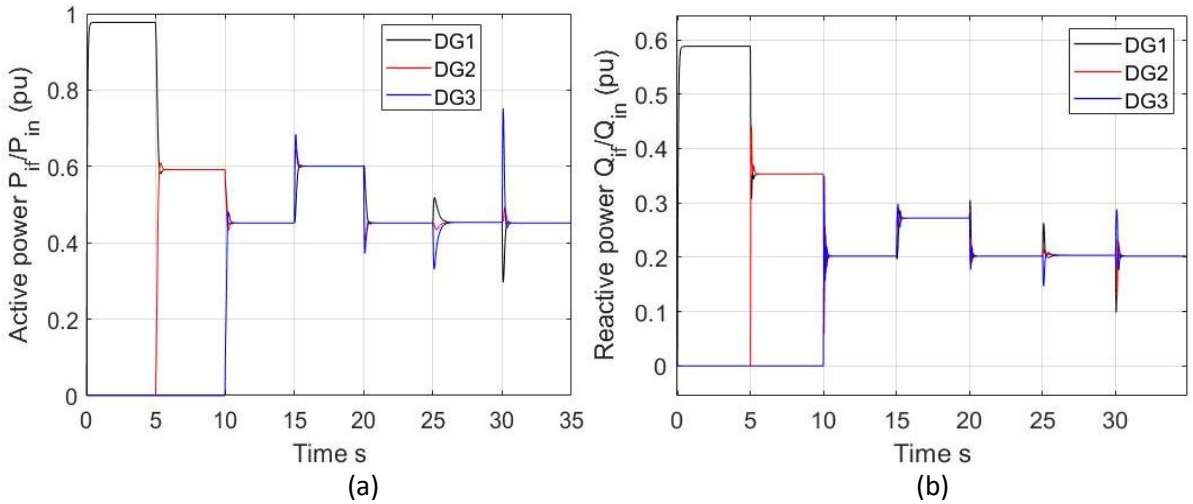


Fig.2.13 Micro-réseau maillé 3-DGs îloté



(a) (b)

Fig.2.14 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 5 s, le deuxième DG est connecté au micro-réseau à 5 s, le troisième DG est connecté au micro-réseau à 15 s).

2.2.4. Validation des stratégies de contrôle proposées dans les micro-réseaux maillés îlotés à l'aide des tests HIL

Dans cette partie, l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée est validée par des expérimentations utilisant des simulations en temps réel Hardware In Loop (HIL). Les tests Hardware in the Loop (HIL) sur le micro-réseau ont été réalisés en utilisant deux technologies. D'abord Opal-RT avec son système NI PXIe-1072 (Figure 2.15) est utilisé pour modéliser le micro-réseau physique par un modèle équivalent précis qui fonctionne en temps réel. Ce système NI PXIe-1072 est équipé par des entrées numériques qui sont interfacées avec les sorties PMW du système de contrôle et de sorties DACs connectées aux entrées ADCs du système de contrôle. Le système de contrôle est développé dans dSPACE via son Microlabbox. Les générateurs de tension triphasés sont implémentés dans le système NI PXIe-1072 grâce à des onduleurs triphasés avec leurs filtres de sortie LC. Leur commande est implémentée dans le système dSPACE avec une commande hiérarchique classique délivrant les signaux PWM comme expliqués en chapitre 1. Les signaux PWM sont envoyés au système NI PXIe-1072. La fréquence de coupure des boucles extérieures de tension a été conçue pour être égale à 100 rad/s. La stratégie de partage de puissance proposée est implémentée dans le système dSPACE. La dynamique des contrôleurs VSI a été prise en considération pour les validations HIL. En raison de la limitation du nombre d'entrées ADC du système de contrôle, la validation HIL des stratégies de contrôle proposées est effectuée en utilisant le micro-réseau maillé de la Figure 2.7 ayant seulement deux DGs en mode de fonctionnement îloté. De plus, la robustesse de la commande par rapport aux changements de topologie et aux variations de charge est également testée et validée par les tests en temps réel HIL. Les figures 2.16a et 2.16b présentent les résultats obtenus à l'aide de HIL, montrant l'évolution des puissances active et réactive délivrées par DG1 et DG2. DG1 impose d'abord la fréquence et la tension du micro-réseau maillé îloté et alimente les charges. Le DG2 est synchronisé avec le vecteur tension du PCC2 (Figure 2.7) pendant l'intervalle 9 s à 10 s, et est connecté au micro-réseau à t = 10 s. On peut voir sur les figures 2.16a et 2.16b que la commande proposée assure une synchronisation efficace et une connexion sans à-coup des DGs au micro-réseau maillé îloté et qu'elle permet une équirépartition des puissances active et réactive consommées entre eux. Afin de vérifier la robustesse du contrôle par rapport aux modifications de la topologie du micro-réseau, le cas du coupure brusque d'une ligne est testé. Les résultats des tests HIL sont présentés sur les figures 2.17a et 2.17b. Ces figures montrent les résultats concernant la connexion du DG2 à 10 s, puis la déconnexion d'une ligne électrique (ligne 2-5 dans la figure 2.7) à t = 20 s et finalement sa reconnexion à t = 30 s. On peut remarquer sur ces figures que le partage de la puissance active et réactive reste efficace même après la déconnexion et la reconnexion d'une ligne électrique.

De même, pour valider la robustesse du contrôle par rapport aux grandes variations de charge, après la connexion du DG2 à 10 s, (la charge 2 de la figure 2.7) est déconnectée à t = 20 s puis reconnectée à t = 30 s. Les résultats des tests HIL, présentés sur les figures 2.18a 2.18b, montre que le partage des puissances active et réactive reste efficace même après la déconnexion et la reconnexion d'une charge à puissances active et réactive élevées.

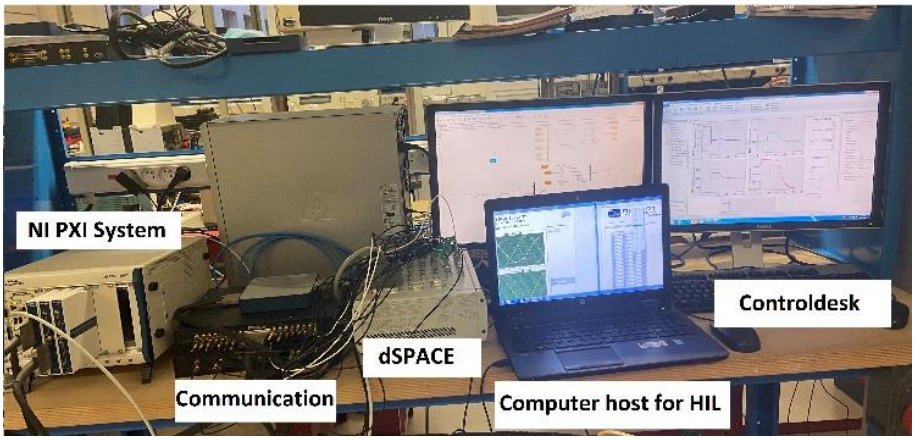
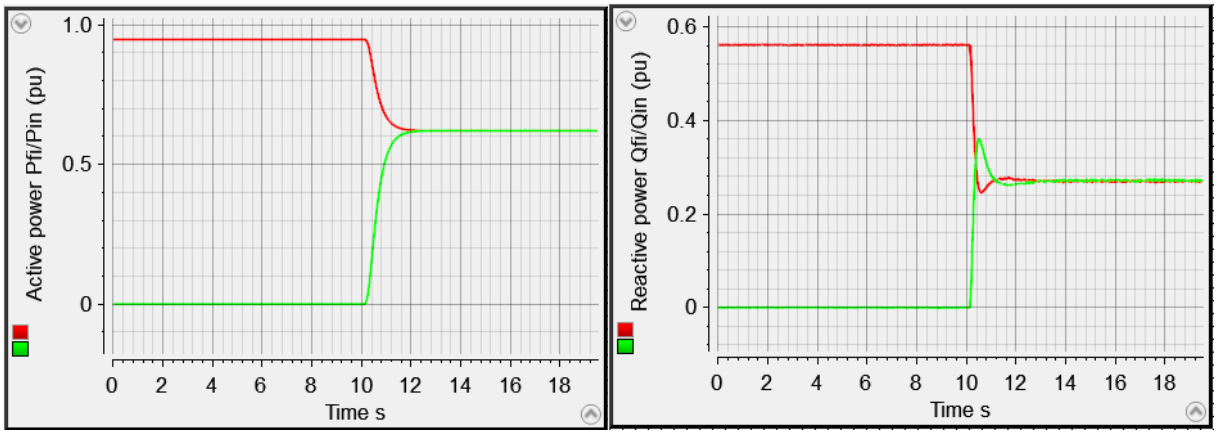
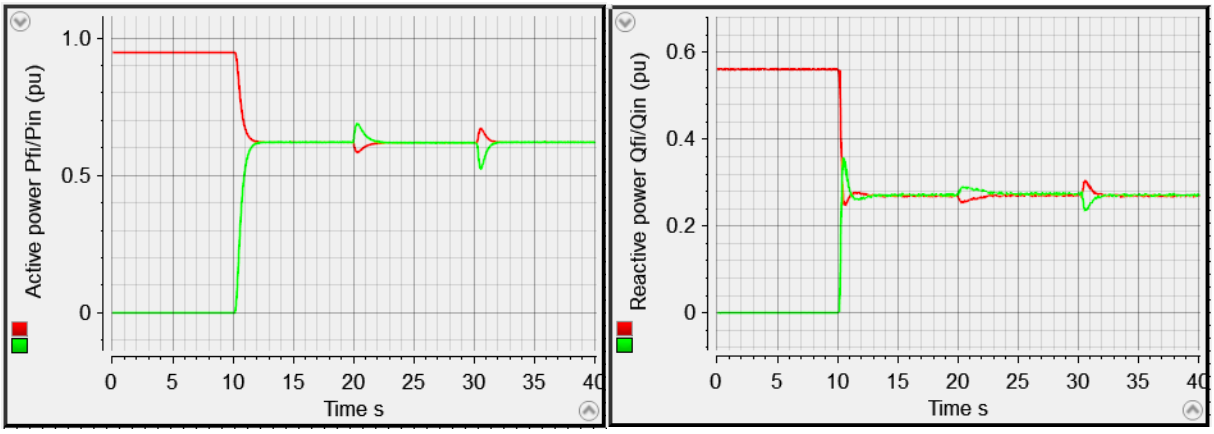


Fig.2.15 Plate-forme expérimentale du système de simulation HIL proposé



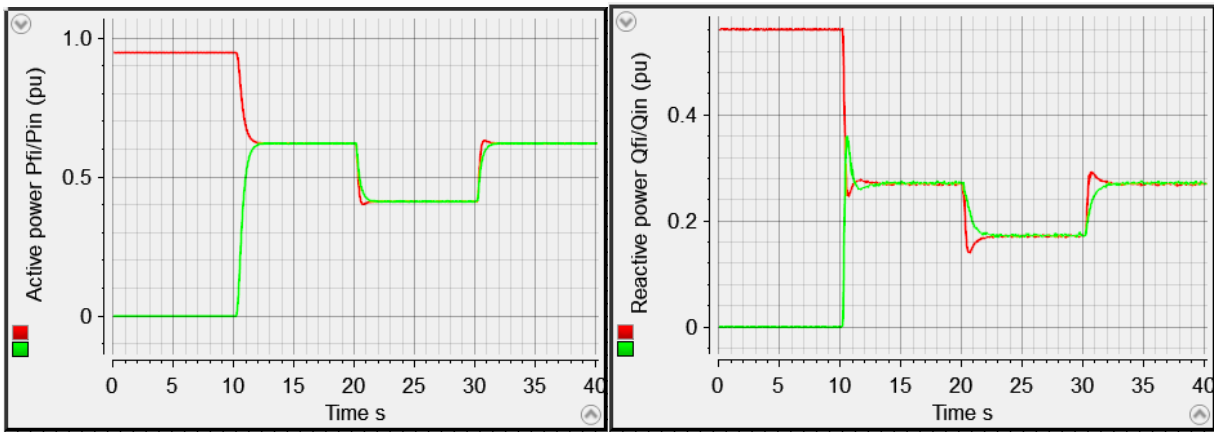
(a) (b)

Fig.2.16 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (HIL).



(a) (b)

Fig.2.17 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (changement de topologie HIL).



(a) (b)

Fig.2.18 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s) (variation de charge HIL).

2.2.5. Impact des délais de communication sur la stabilité du micro-réseau.

La commande proposée pour le partage de la puissance est décentralisée et utilise l'information sur la valeur efficace mesurée de la tension à un nœud pilote (le nœud µGpcc dans la figure 2.13) qui est envoyée à tous les contrôleurs locaux des DG du micro-réseau. L'accès à cette information nécessite une communication unidirectionnelle du nœud µGpcc vers tous les DG connectés au micro-réseau. Cette communication peut affecter la stabilité du micro-réseau si des retards de communication élevés se produisent [96]-[97].

Afin d'examiner et d'évaluer l'impact du délai de communication sur la commande non linéaire proposée, des simulations sur simscape est effectuer. Le micro-réseau maillé de la Figure 2.13 est considérer et les 3 DG sont connectés au micro-réseau îloté à t = 0 s. Tout d'abord, la commande droop classique (sans le terme non linéaire $J_i(P_{if} - P_{in})$ dans (2.6) et (2.7)) est appliquée jusqu'à t = 5 s. À t = 5 s, la commande non linéaire proposée pour le partage de la puissance est appliquée en ajoutant le terme non linéaire $J_i(P_{if} - P_{in})$ dans (2.7). Comme mentionné ci-dessus, ce terme doit recevoir l'information sur la valeur efficace de la tension du µGpcc. Afin de prendre en compte le délai de communication pour la réception de ces informations, un filtre du premier ordre avec une constante de temps de T_d, dont l'expression est détaillée dans l'équation (2.24), est ajouté au schéma MATLAB/Simscape (Figure 2.19). Pour étudier l'impact du délai de communication sur l'efficacité de la méthode de contrôle du partage de la puissance proposée et sur la stabilité du micro-réseau, la valeur de T_d est modifiée de 300 ms à 1,7 s. Ensuite, à 15 s, la charge 2 est déconnectée pour tester la robustesse du contrôle par rapport à la variation de la charge tout en appliquant des délais de communication.

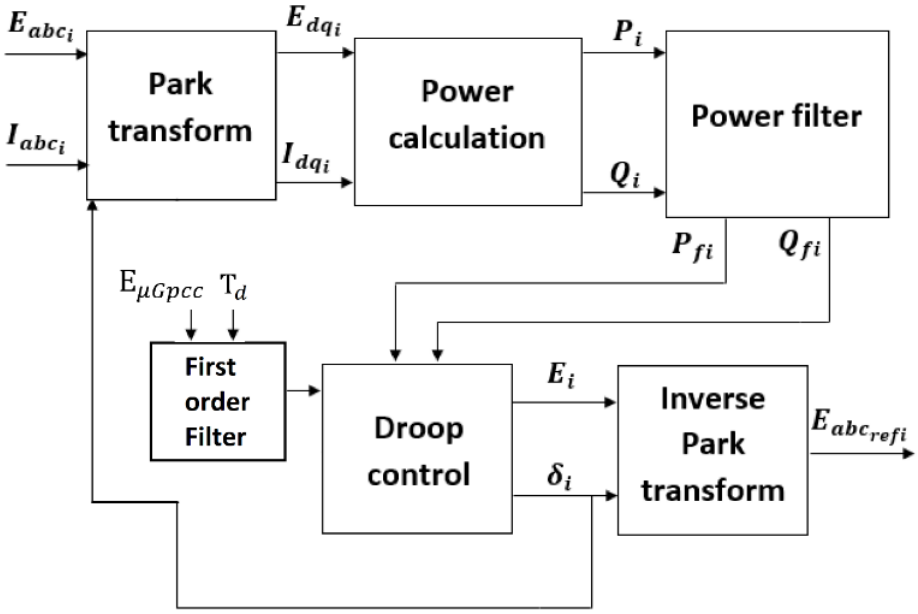
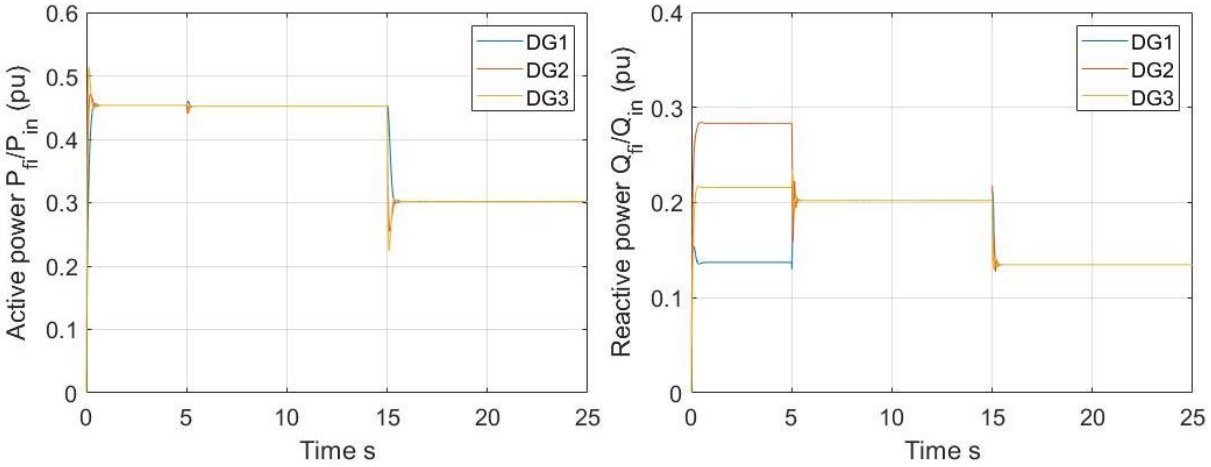


Fig.2.19 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DG à commande droop dans Simscape

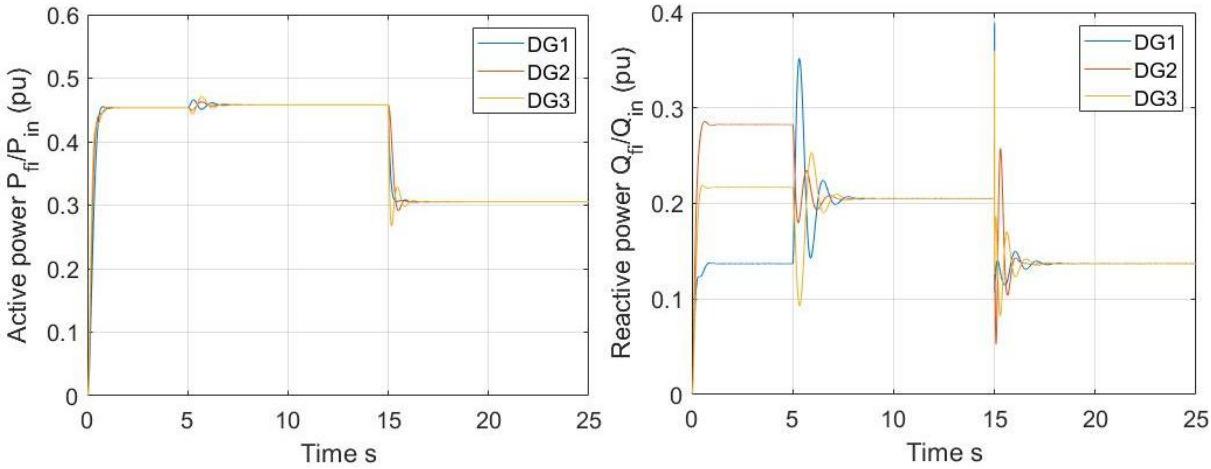
$$\frac{E^*_{\mu Gpcc}}{E_{\mu Gpcc}} = \frac{1}{1+\frac{1}{T_d}*s} \tag{2.24}$$

Pour le premier test de délai de communication, les figures 2.20a et 2.20b montrent l'évolution des puissances active et réactive des DG lorsque le délai de communication est fixé à 100 ms. On peut voir dans les figures 2.20 (a) and 2.20 (b) que le partage de la puissance active et réactive reste parfait et que la stabilité du micro-réseau reste assurée même après la déconnexion de la charge 2 à 15 s. Un deuxième test avec un délai de communication de 300 ms, ce qui représente la technologie de communication à large portée la plus lente [96]. On peut voir dans les figures 2.21 (a) and 2.21 (b) que le partage de la puissance active et réactive n'est pas affecté et que la stabilité du micro-réseau reste assurée même après la déconnexion de la charge 2 à 15 s. Lorsque le délai de communication est fixé à 600 ms, comme montré dans les figures 2.22 (a) et 2.22 (b) les performances du contrôleur semblent être légèrement affectées. Des oscillations peuvent être observées sur les puissances actives et réactives des DG après l'application du contrôle non linéaire à 5 s et après la déconnexion de la charge 2 à 15 s. Cependant, ces oscillations de puissance s'atténuent et le partage précis de la puissance des DG est rétabli. Enfin, lorsque le délai de communication est fixé à 1,7 s, le partage de la puissance est totalement perdu et le micro-réseau devient instable, comme le montrent les figures 2.23a et 2.23b. Plus précisément, le délai de communication élevé entraîne des erreurs de calcul pour le terme non linéaire. De plus, le contrôleur droop ne peut pas calculer avec précision les termes de correction droop. Le délai de communication maximal pouvant être géré par le contrôleur est de 1,4 s, ce qui se traduit par une communication beaucoup plus lente que toute technologie de communication à large portée disponible. Ce résultat signifie que la stratégie de contrôle proposée est suffisamment robuste par rapport aux valeurs pratiques du délai de communication et peut donc être appliquée au contrôle des DG des micro-réseaux maillés.



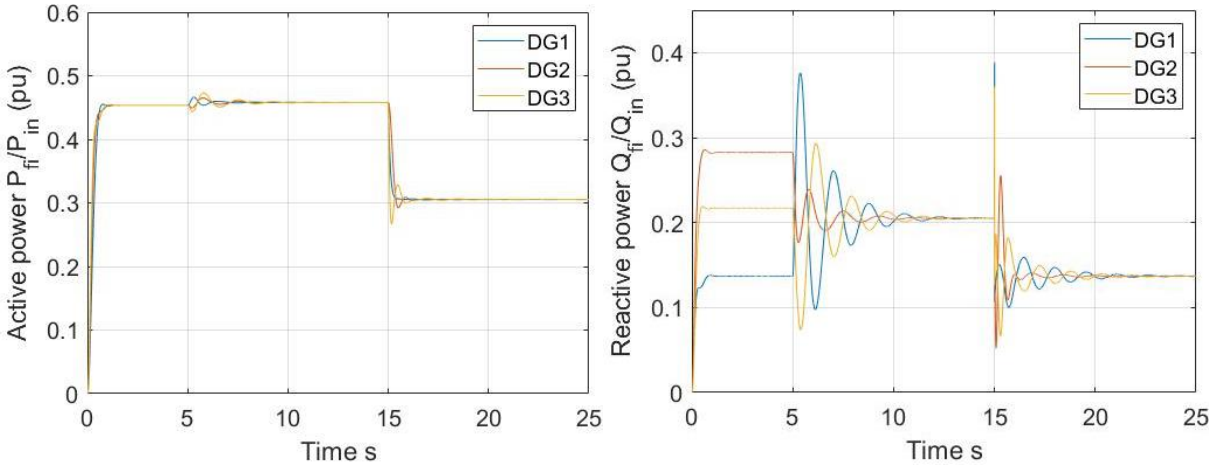
(a) (b)

Fig.2.20 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 100 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s).



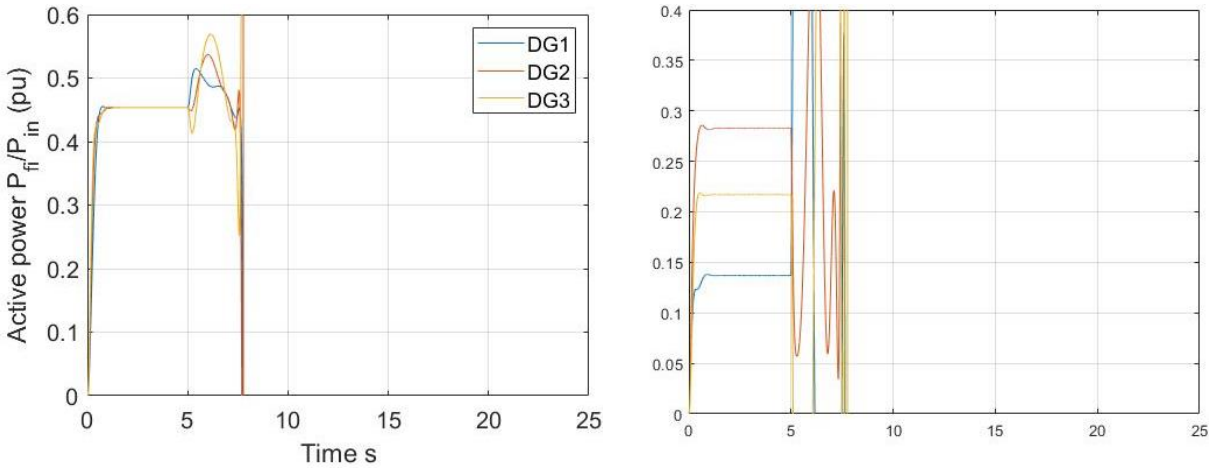
(a) (b)

Fig.2.21 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 300 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s).



(a) (b)

Fig.2.22 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 600 ms (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s).



(a) (b)

Fig.2.23 Evolution of the DG active (a) and reactive (b) powers with a communication delay of 1.7 s (All DGs are connected to the microgrid at 0 s. Load 2 is disconnected at 15 s).

2.3. Modélisation du système pour son analyse de stabilité

En raison de l'interaction entre les DGs et les charges, la stabilité des micro-réseaux est fortement influencée. Par conséquent, pour étudier la stabilité et la robustesse du micro-réseau contrôlé par la commande droop non-linéaire proposée, un modèle mathématique dynamique complet du système entier est établi dans cette section.

2.3.1. Modèle espace-état d'un générateur distribué (DG)

Les équations décrivant le comportement du i^{ème} DG sont présentées sur le schéma synoptique équivalent de la figure 2.24. Il est composé de quatre blocs en cascade pour lesquels la relation entre leurs sorties et leurs entrées est présentée ci-après.

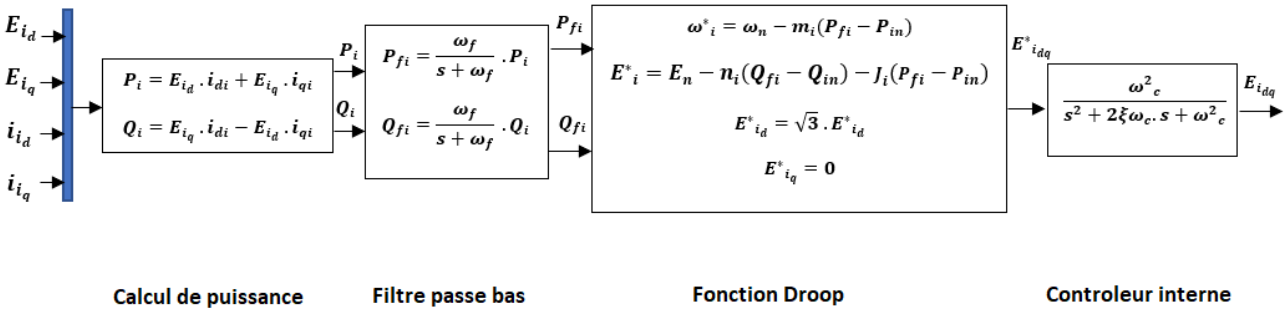


Fig.2.24 Diagramme synoptique équivalent décrivant un DGi contrôlé par droop.

Dans le premier bloc (figure 2.24), les composante d-q de la tension (E_{i_d}, E_{i_q}) et du courant (i_{di}, i_{qi}) mesurées du i^{ème} DG sont utilisées pour calculer les puissances actives et réactives instantanées à l'aide des équations classiques (2.25).

$$\begin{cases} P_i = E_{i_d}.i_{i_d} + E_{i_q}.i_{i_q} \\ Q_i = E_{i_q}.\ i_{i_d} - E_{i_d}.i_{i_q} \end{cases} \quad (2.25)$$

Dans le deuxième bloc, les puissances actives et réactives instantanées (P_i et Q_i) sont filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas du premier ordre pour obtenir les valeurs moyennes (filtrées) P_{if} et Q_{if} en

utilisant les relations (2.26). Il faut souligner que la fréquence de coupure ω_f du filtre est liée à la dynamique souhaitée pour la commande Droop.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_{if} = \omega_f\left(P_i - P_{if}\right) \\ \frac{d}{dt}Q_{if} = \omega_f\left(Q_i - Q_{if}\right) \end{cases} \quad (2.26)$$

Le troisième bloc applique la commande Droop non-linéaire proposée dans les équations (2.6), (2.7) et (2.8), en utilisant P_{if} et Q_{if} pour assurer le partage des puissances active et réactive entre les DGs.

Le quatrième bloc modélise le retard imposé par l'ensemble onduleur de tension-sa commande-filtre de sortie (Figure 1.7, chapitre 1), contrôlant les tensions de sortie du i^{ème} DG, par un filtre du second ordre de pulsation ω_c (relation (2.27)). Ce filtre a une dynamique plus rapide par rapport à la boucle de contrôle droop externe ($\omega_c \gg \omega_f$). La relation entre la tension de sortie du i^{ème} DG et sa référence de tension est exprimée par la fonction de transfert définie dans (2.27) :

$$\frac{E_{i_d}}{E^*_{i_d}} = \frac{E_{i_q}}{E^*_{i_q}} = \frac{{\omega_c}^2}{s^2+2\xi\omega_c.s+{\omega_c}^2} \quad (2.27)$$

2.3.2. Structure et modélisation du micro-réseau

Le micro-réseau maillé multi-PCC considéré, présenté sur la Figure 2.25, est composé de deux DGs et trois charges inductives classiques modélisées par des circuits R-L en série, interconnectés par des lignes modélisées par des circuits RLC (modèle de type π). Les lignes reliant les PCCi et PCCj ont une résistance r_{ij}, une inductance l_{ij}, et une capacité c_{ij} divisée en deux capacités identiques $c_{ij}/2$ et reporter sur les nœuds PCCi et PCCj (modèle de type π). La capacité c_i pour le i^{ème} PCC est la somme des capacités des lignes connectées au PCCi.

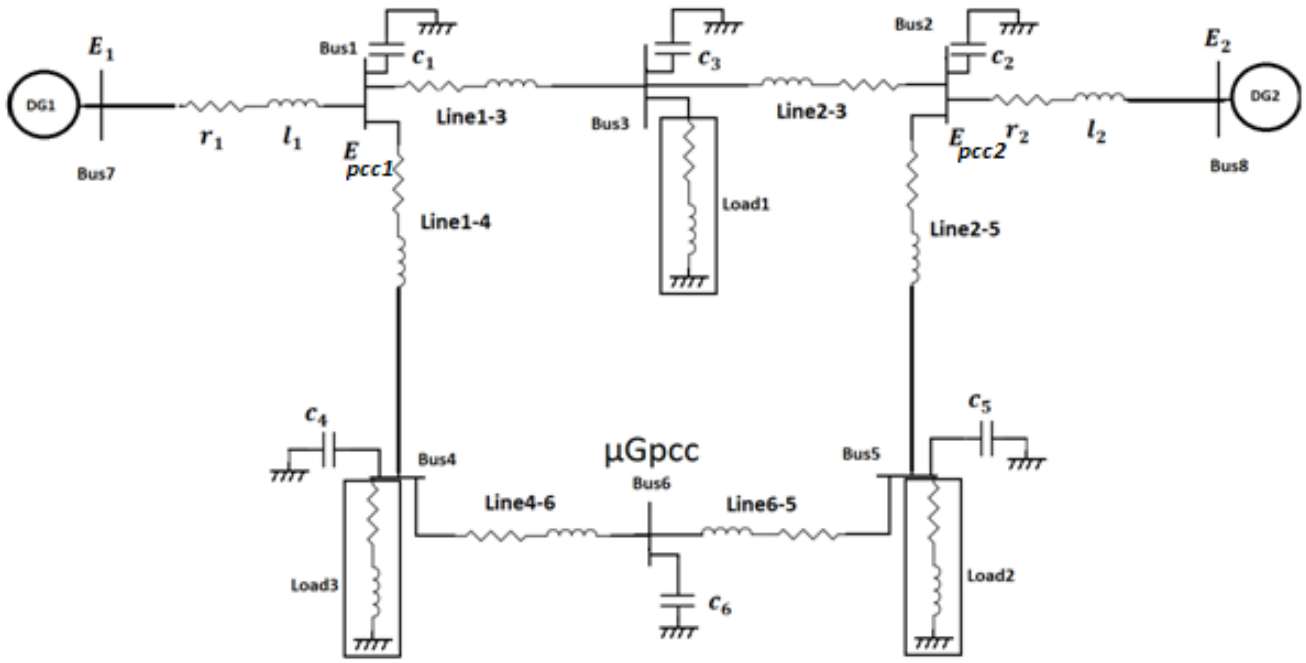


Fig.2.25 Micro-réseau maillé ilote.

Afin d'étudier le micro-réseau considéré comportant deux DGs, les équations d'état sont données en utilisant un cadre de référence commun pour exprimer les différentes variables. Le cadre de référence d-q utilisé est défini de manière à ce que son axe d soit orienté vers le premier vecteur de

tension DG1 ($\bar{E}_1$ Figure 2.26). Ensuite, l'axe d est décalé de δ_1 par rapport à l'axe α, où δ_1 est l'argument du vecteur tension du DG1 ($\bar{E}_1 = E_1 e^{j\delta_1} = E_{1_\alpha} + jE_{1_\beta}$). Le référentiel d-q tourne avec une vitesse électrique de $\omega_1 = \frac{d\delta_1}{dt}$ par rapport au référentiel fixe $\alpha - \beta$. Lorsque les différents DG sont synchronisés et connectés au micro-réseau, leurs pulsations ($\omega_1 = \frac{d\delta_1}{dt}$ and $\omega_2 = \frac{d\delta_2}{dt}$) varient pour assurer l'équirépartition de la puissance active consommée et deviennent égales en régime établi c.-à-d. ω_1 = ω_2 = ω_{com}. Sachant que les vecteurs tensions $\bar{E}_1$ et $\bar{E}_2$ de DG1 et DG2 ont les valeurs efficaces de E_1 et E_2, leurs composantes $\alpha - \beta$ sont obtenues en utilisant la transformation de Concordia T_{32}^t dans (2.28) et (2.29) :

$$\begin{pmatrix} E_{1_\alpha} \\ E_{1_\beta} \end{pmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} E_{1_a} \\ E_{1_b} \\ E_{1_c} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_1.\cos\delta_1 \\ \sqrt{3}.E_1.\sin\delta_1 \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} E_{2_\alpha} \\ E_{2_\beta} \end{pmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} E_{2_a} \\ E_{2_b} \\ E_{2_c} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_2.\cos\delta_2 \\ \sqrt{3}.E_2.\sin\delta_2 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

$$\text{Où: } T_{32}^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

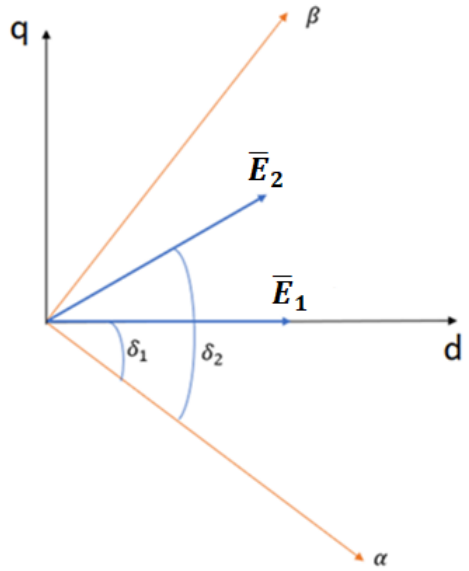


Fig.2.26 Cadres de référence α-β et d-q

Ensuite, les équations (2.30) et (2.31) donnent la relation entre les composantes d-q des vecteurs tensions $\bar{E}_1$ et $\bar{E}_2$ de DG1 et DG2 et leurs composantes $\alpha - \beta$.

DG1:
$$\begin{cases} \begin{pmatrix} E_{1_d} \\ E_{1_q} \end{pmatrix} = P(-\delta_1).\begin{pmatrix} E_{1_\alpha} \\ E_{1_\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & \sin\delta_1 \\ -\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix}.\begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_1.\cos\delta_1 \\ \sqrt{3}.E_1.\sin\delta_1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} E_{1_d} \\ E_{1_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2.30)$$

DG2:
$$\begin{cases} \begin{pmatrix} E_{2_d} \\ E_{2_q} \end{pmatrix} = P(-\delta_1).\begin{pmatrix} E_{2_\alpha} \\ E_{2_\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & \sin\delta_1 \\ -\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix}.\begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_2.\cos\delta_2 \\ \sqrt{3}.E_2.\sin\delta_2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} E_{2_d} \\ E_{2_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}.E_2.\cos(\delta) \\ \sqrt{3}.E_2.\sin(\delta) \end{pmatrix} \quad \text{Avec: } \delta = \delta_2 - \delta_1 \end{cases} \quad (2.31)$$

Les équations (2.32) présentent un modèle de réseau de N lignes électriques d'un micro-réseau maillé, reliant PCC_i à PCC_j interconnectés. Les M nœuds (PCCs ou Bus sur la figure 2.25) du micro-

réseau ne sont pas tous forcément interconnectés par des lignes et même certaines lignes peuvent être déconnecté suite à un défaut, $i\ et\ j \in [1,2,\dots,M]$ avec $i \neq j$ (Figure 2.25). Le micro-réseau considéré comporte 8 nœuds (PCC_i, avec, $i \in [1,2,\dots,M]$) dont deux nœuds sont connectés aux DG1 et DG2 et leurs tensions sont imposées par leurs commandes Droop. Les différents nœuds de ce micro-réseau sont connectés par uniquement 8 lignes en mode normal. Les équations (2.32) définissent les dynamiques des composantes d et q du courant de la ligne reliant PCC_i à PCC_j du micro-réseau. Pour les 8 lignes du micro-réseau considéré, nous obtenons donc 16 équations pour les courants de lignes.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ij_d} = \frac{1}{l_{ij}} \Delta E_{ij_d} - \frac{r_{ij}}{l_{ij}} i_{ij_d} + \omega_{com} i_{ij_q} \\ \frac{d}{dt} i_{ij_q} = \frac{1}{l_{ij}} \Delta E_{ij_q} - \frac{r_{ij}}{l_{ij}} i_{ij_q} - \omega_{com} i_{ij_d} \\ \text{Avec: } \Delta E_{ij_d} = \left(\mathrm{E}_{i_d} - \mathrm{E}_{j_d}\right)\ et\ \Delta E_{ij_q} = \left(\mathrm{E}_{i_q} - \mathrm{E}_{j_q}\right) \end{cases} \quad (2.32)$$

Les charges considérées dans ce micro-réseau sont modélisées par des circuits passifs en R-L série (Fig. 2.25). Les équations de tension dans (2.33) sont écrites pour les PCCs non connectés aux DGs et les équations de courant dans (2.34) concernent les charges connectées éventuellement à ces PCCs.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} E_{pcci_d} = \frac{1}{C_{pcci}} \left(\sum i_{ij_d} - i_{CHi_d}\right) + + \omega_{com} \,.\, E_{pcci_q} \\ \frac{d}{dt} E_{pcci_q} = \frac{1}{C_{pcci}} \left(\sum i_{ij_q} - i_{CHi_q}\right) - \omega_{com} \,.\, E_{pcci_d} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{CHi_d} = \frac{1}{L_{CHi}} \left(E_{pcci_d} - R_{CHi} \,.\, i_{CHi_d}\right) + \omega_{com} \,.\, i_{CHi_q} \\ \frac{d}{dt} i_{CHi_q} = \frac{1}{L_{CHi}} \left(E_{pcci_q} - R_{CHi} \,.\, i_{CHi_q}\right) - \omega_{com} \,.\, i_{CHi_d} \end{cases} \quad (2.34)$$

E_{pcci_d} et E_{pcci_q} sont les composantes d-q de la tension PCCi. Les charges considérées dans ce travail étaient des charges passives modélisées par un circuit R-L en série. La somme des courants connectés au PCCi étant nulle (loi des courants de Kirchhoff), l'équation (2.33) concerne tous les PCCs sauf ceux connectés aux DGs pour lesquels les tensions sont imposées par leurs contrôleurs droop.

Il convient de noter que $\sum_j i_{ij_d}$et $\sum_j i_{ij_q}$dans le système d'équations (2.33) sont la somme des composantes d et q des courants des lignes électriques connectées au PCC_i.

Le modèle global du micro-réseau présenté dans la Figure 2.25, y compris les commandes de ses DGs, défini par les équations précédentes, possède 49 variables d'état qui constituent les éléments du vecteur d'état x, décrit dans la suite (2.35) :

$$\begin{aligned} &[x]^T \\ &= [i_{1_d}\ i_{1_q}\ i_{2_d}\ i_{2_q} i_{13_d}\ i_{13_q}\ i_{23_d}\ i_{23_q}\ i_{25_d}\ i_{25_q}\ i_{14_d}\ i_{14_q}\ i_{56_d}\ i_{56_q}\ i_{46_d}\ i_{46_q} E_{\mathrm{pcc}1_d}\ E_{\mathrm{pcc}1_q}\ E_{\mathrm{pcc}2_d}\ E_{\mathrm{pcc}2_q} \\ &\quad E_{\mathrm{pcc}3_d}\ E_{\mathrm{pcc}3_q}\ E_{pcc4_d}\ E_{\mathrm{pcc}4_q}\ E_{pcc5_d}\ E_{\mathrm{pcc}5_q}\ E_{\mathrm{pcc}6_d}\ E_{pcc6_q}\ i_{CH1_d}\ i_{CH1_q}\ i_{CH2_d}\ i_{CH2_q}\ i_{CH3_d}\ i_{CH3_q} P_{f1}\ Q_{f1} \\ &\quad P_{f2}\ Q_{f2}\ \delta\ E_{1_d}\ E_{1_q}\ E_{2_d}\ E_{2_q}\ \dot{E}_{1_d}\ \dot{E}_{1_q}\ \dot{E}_{2_d}\ \dot{E}_{2_q} J_1\ J_2] \end{aligned} \quad (2.35)$$

Le modèle global du micro-réseau est non linéaire et peut finalement se présenter sous la forme suivante :

$$\dot{x} = f(x) \text{ with } f: R^n \to R^n, n = 49 \quad (2.36)$$

2.3.3. Validation du modèle d'état

Les résultats concernant l'évolution des puissances actives et réactives des DGs, obtenus à l'aide du modèle Simscape et du modèle mathématique développé sur Matlab editor, ont été utilisés pour valider le modèle d'état établi. Le même scénario de simulation a été considéré pour obtenir les résultats à l'aide des deux modèles. Les deux DGs ont été connectés au micro-réseau à 0 s et le contrôleur non linéaire a été appliqué à t = 2s. Les résultats de simulation des deux modèles considérés sont présentés dans les Figures 2.27a et 2.27b, illustrant l'évolution des puissances active et réactive de DG1 et DG2. La Figure 2.27c montre une vue agrandie de l'état transitoire après la connexion des deux DG. Les deux modèles ont conduit à des résultats similaires ; par conséquent, le modèle d'état établi est considéré comme validé. Il peut donc être utilisé pour étudier la stabilité du micro-réseau, en intégrant son contrôle.

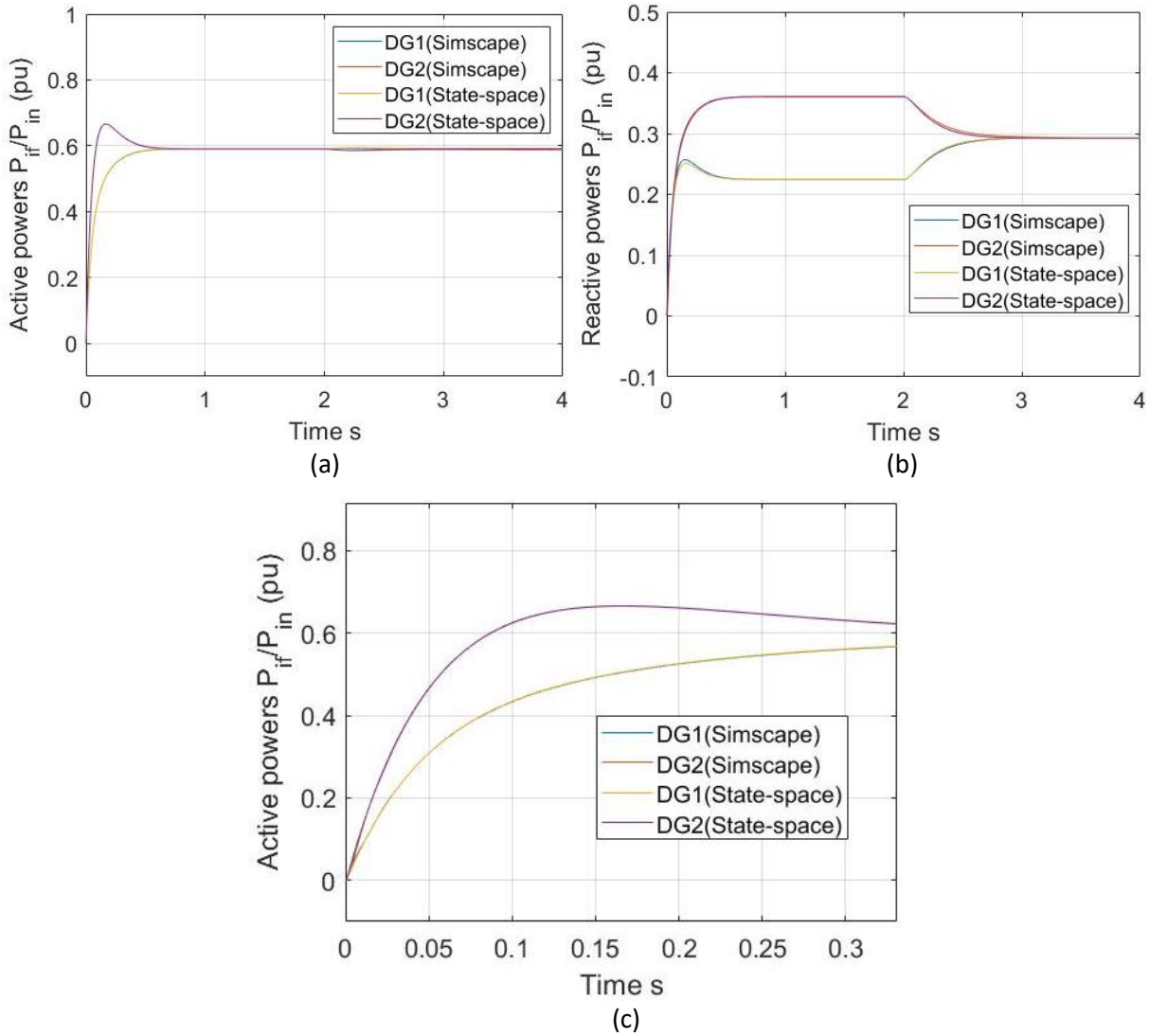


Fig.2.27 Résultats de la simulation obtenus à l'aide de Simscape et du modèle d'état mathématique. Les deux DG ont été connectés au micro-réseau à t= 0s et la commande non linéaire est appliquée à t = 2s. (a) Evolution des puissances actives des DG par unité. (b) Evolution des puissances réactives des DG par unité. (c) Zoom sur les puissances réactives par unité autour de 0s.

2.4. Etude de la stabilité du micro-réseau maillé basée sur son modèle d'état

Afin d'étudier la stabilité du micro-réseau, défini par le système différentiel non linéaire (2.26), et d'analyser son comportement dynamique, influencé par plusieurs paramètres de contrôle, les valeurs propres de la matrice jacobienne $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x_0}$ au point de fonctionnement $f(x_0) = 0$ sont calculées. Le système, c'est-à-dire le micro-réseau, sera asymptotiquement stable autour du point de fonctionnement x_0 si les parties réelles de toutes les valeurs propres sont strictement négatives. Une analyse de sensibilité des valeurs propres aux différents paramètres du système est ensuite effectuée pour détecter ceux pouvant impacter sévèrement la stabilité du système.

Les paramètres du système sont indiqués dans les tableaux 2.3, 2.4 et 2.5. Les charges sont modélisées par des charges RL en série. Les valeurs de R et L sont choisies en fonction du point de fonctionnement de ces charges. Les paramètres des DGs correspondent à leurs puissances nominales (puissances disponibles) et aux paramètres imposant le comportement dynamique de leur commande (ω_f, ω_c, ξ, variations admissibles de pulsation Δ_ω et de tension Δ_E).

Table 2.3 Paramètres des charges électriques du micro-réseau considéré

Charges RL series	Resistance (Ω)	Inductance (H)
Load 1	32	0.02496
Load 2	30	0.01765
Load 3	34	0.01564

Table 2.4 Paramètres des DG considérés

DGs	Puissance Active nominale/disponible (kW)	Puissance Réactive nominale/disponible (kVAr)	Tension entre phase nominale (V)	Fréquence de coupure des filtres des puissances (rad/s)	Fréquence de coupure des filtres pour les onduleurs (rad/s)	Facteur d'amoritissement	Variations admissibles de la pulsation (pour la commande Droop)	Variations admissibles de la tension (pour la commande Droop)
DG1	$P_{1n} = 14.5$	$Q_{1n} = 5.3$	400	$\omega_{f1} = 20$	$\omega_{c1} = 1000$	$\xi = 0.7$	$\Delta_\omega = 0.5$	$\Delta_E = 6$
DG2	$P_{2n} = 10$	$Q_{2n} = 4$	400	$\omega_{f2} = 20$	$\omega_{c2} = 1000$	$\xi = 0.7$	$\Delta_\omega = 0.5$	$\Delta_E = 6$

Les valeurs propres du système au point de fonctionnement considéré, correspondant aux paramètres des charges, des lignes et des DGs, donnés dans les tableaux 2.1, 2.3 et 2.4, sont présentées dans le tableau 2.5. On peut observer que la matrice jacobienne $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x_0}$ a 5 des valeurs propres réelles négatives et 44 valeurs propres complexes deux par deux conjugués à parties réelles négatives.

Table 2.5 Valeurs propres dans les conditions de fonctionnement nominales

λ	Valeur
$\lambda_{1,2}$	$(-0.1473 \pm 48700)\times10^3$
$\lambda_{3,4}$	$(-0.1473 \pm 48699)\times10^3$
$\lambda_{5,6}$	$(-0.1375 \pm 40463)\times10^3$
$\lambda_{7,8}$	$(-0.1375 \pm 40462)\times10^3$
$\lambda_{9,10}$	$(-0.1278 \pm 38009)\times10^3$
$\lambda_{11,12}$	$(-0.1278 \pm 38008)\times10^3$
$\lambda_{13,14}$	$(-0.1294 \pm 24235)\times10^3$
$\lambda_{15,16}$	$(-0.1294 \pm 24234)\times10^3$
$\lambda_{17,18}$	$(-0.1310 \pm 21721)\times10^3$
$\lambda_{19,20}$	$(-0.1310 \pm 21720)\times10^3$
$\lambda_{21,22}$	$(-0.0819 \pm 4210)\times10^3$
$\lambda_{23,24}$	$(-0.0819 \pm 4211)\times10^3$
$\lambda_{25,26}$	$(-1.4379 \pm 0.31415)\times10^3$
$\lambda_{27,28}$	$(-1.5067 \pm 0.31420)\times10^3$
$\lambda_{29,30}$	$(-1.5067 \pm 0.31420)\times10^3$
$\lambda_{31,32}$	$(-0.0899 \pm 0.38415)\times10^3$
$\lambda_{33,34}$	-273 ± 314.14
$\lambda_{35,36}$	-703 ± 714.14
$\lambda_{37,38}$	-698 ± 711.14
$\lambda_{39,40}$	-699 ± 714.14
$\lambda_{41,42}$	-4.39 ± 2.85
λ_{43}	-1.707
λ_{44}	-23.2
λ_{45}	-16
λ_{46}	20.4
λ_{47}	-20
$\lambda_{48,49}$	$(-0.70000 \pm 0.71414)\times10^3$

Toutes les valeurs propres de la matrice jacobienne $\left(\frac{\partial \mathrm{f}}{\partial \mathrm{x}}\right)_{\mathrm{x}_0}$ ont des parties réelles négatives, par conséquent le micro-réseau, y compris le contrôle de ses DGs, peut être considéré comme un système stable autour du point de fonctionnement considéré. L'étude de la stabilité du micro-réseau maillé considéré autour d'autres points de fonctionnement peut également être menée sur la base du modèle d'état établi.

Afin d'effectuer l'analyse de sensibilité et de trouver les paramètres qui influencent les différentes valeurs propres, les paramètres des différents constituants du micro-réseau, y compris ses paramètres de contrôle, ont été modifiés séparément. Dans les sections suivantes, l'évolution des trajectoires des valeurs propres avec la variation des paramètres de chaque constituant du micro-réseau est discutée pour vérifier leur impact sur la stabilité du système.

2.4.1. Analyse des trajectoires des valeurs propres et l'étude de leurs sensibilités pour différentes valeurs des paramètres des lignes électriques

Pour faire varier les paramètres des 8 lignes électriques du micro-réseau, les valeurs des longueurs de toutes ces lignes électriques sont modifiées. Pour chaque ligne, la longueur est modifiée par 10 pas de 10%, partant de la longueur initiale à deux fois cette longueur. Les valeurs propres de la matrice Jacobéenne sont déterminées, et leur évolution est montrée sur la Figure 2.28. La variation des paramètres des lignes électriques n'impacte que les valeurs propres λ_1 à λ_{16} qui sont deux à deux les nombres complexes conjugués, les autres valeurs propres λ_{17} à λ_{49} ne varient pas significativement avec l'évolution des paramètres des lignes électriques. Les parties réelles des valeurs propres impactées (λ_1 à λ_{16}) reste significativement négatives mais deviennent plus proches de zéro pour ne pas impacter la stabilité du système lorsque les longueurs des lignes sont augmentées dans l'intervalle considéré.

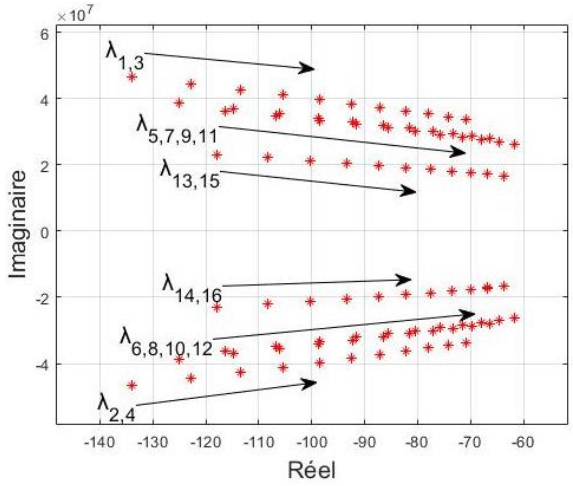
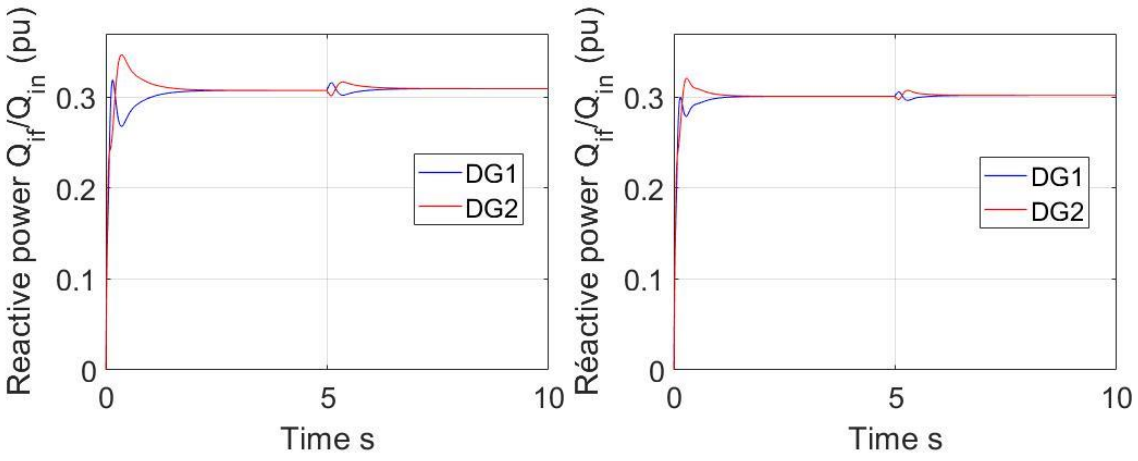


Fig.2.28 Évolution des valeurs propres correspondant aux changements des paramètres des lignes

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que les paramètres de ligne n'affectent pas la stabilité du système. Les résultats des simulations réalisée à l'aide du Simscape avec les nouvelles valeurs des lignes, sont illustrés sur la Figure 2.29 (a). À t = 5s les valeurs des paramètres des lignes sont augmenté de 15% pour montrer que le système est stable autour de son point de fonctionnement. Pour comparer des simulations réalisées à l'aide du Simscape avec les valeurs nominales des lignes, sont illustrés sur la Figure 2.29 (b). Aussi comme présenter en figure 2.29 (b), à t = 5s les valeurs des paramètres des lignes sont augmenté de 15%.

Ces résultats confirment qu'avec une variation limitée des paramètres des lignes (dédoublement des longueurs des lignes), la stabilité du système n'est pas affectée, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi (les parties réelles des pôles se déplacent vers la droite dans le plan complexe des pôles considérés, Fig. 2.28). Cela confirment également les résultats des tests de robustesse face aux changements de topologie du micro-réseau (sections 2.2.3 et 2.2.4).



(a) (b)

Fig.2.29 Évolution des puissances active et réactive des DGs obtenue avec le modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s et à t = 5 s les valeurs des paramètres des lignes sont augmenté de 15%.) : (a) avec deux fois les valeurs initiales des paramètres des lignes. (b) avec les valeurs initiales des paramètres des lignes.

2.4.2. Analyse des trajectoires des valeurs propres et l'étude de leurs sensibilités pour différentes valeurs des paramètres des DGs

En suivant la même approche que dans la section 2.4.1, dans cette section nous étudions l'impact d'autres paramètres sur la stabilité du système. Pour les DGs considérées, les paramètres qui peuvent avoir un impact sur la stabilité du système sont la fréquence de coupure ω_f pour le calcul des puissances active et réactives filtrées (Equations 2.26), la valeur de la fréquence de coupure ω_c du filtre du second ordre (Equation (2.27)), ainsi que la chute de fréquence Δ_ω, la chute de tension Δ_E dans les Equations (2.6) à (2.8) et Ki paramètre de contrôle non linéaire

Tout d'abord, la fréquence de coupure ω_f est modifiée par 10 pas (de sa valeur initiale à 10 fois cette valeur), les valeurs propres de la matrice Jacobéenne sont déterminées, et leurs évolutions sont illustrées sur la Figure 2.30.

La variation de ω_f a un impact sur les valeurs propres négatives réelles λ46, λ47 et λ43 (pôles réels) ainsi que sur les valeurs propres λ35 à λ40, λ31 et λ32 et λ41 et λ42 qui sont deux à deux des nombres complexes conjugués. Les autres valeurs propres ne varient pas significativement avec l'évolution de ω_f.

On constate que lorsque ω_f augmente, les valeurs propres λ46, λ46 et λ43 (pôles réels) ainsi que sur les valeurs propres λ35 à λ40 et λ41 et λ42 sont décalées vers la gauche tandis que λ31 et λ32 8 se déplace légèrement vers zéro, mais leurs valeurs ne changent pas considérablement et restent largement négatives. Le système reste toujours stable lorsque ω_f augmente.

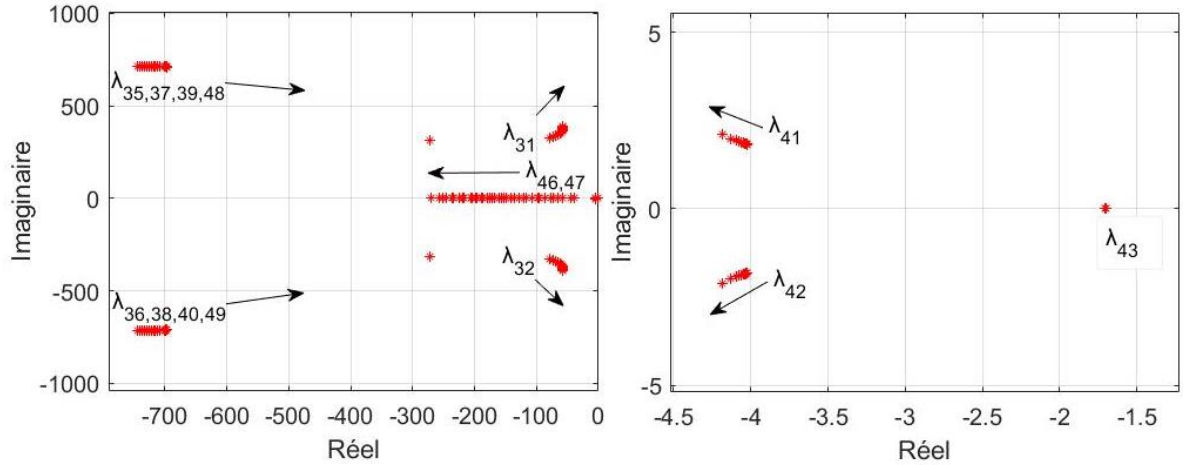
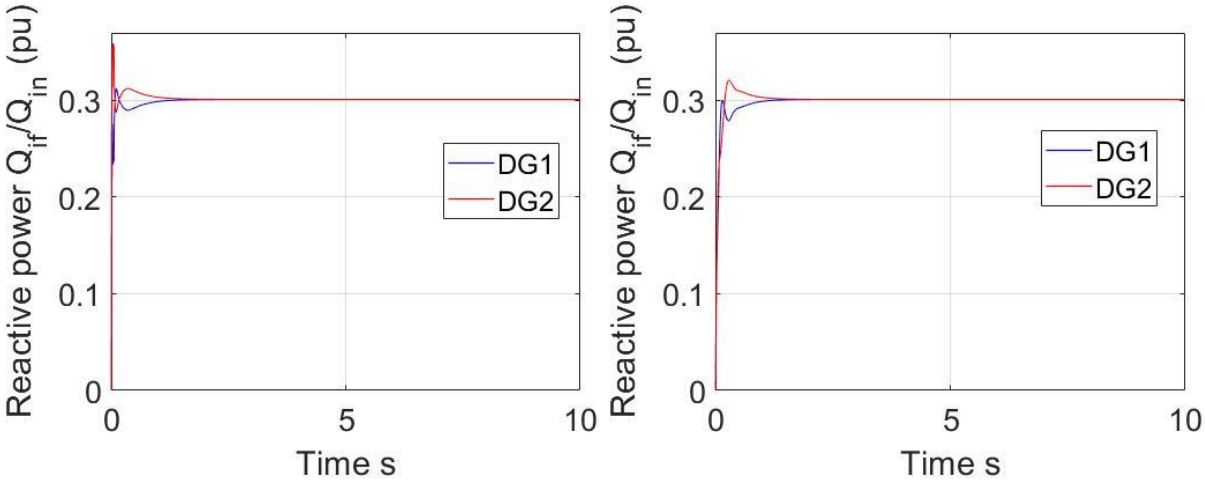


Fig.2.30 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de ω_f (20<ω_f<200(rad⁄s) avec ω_f croissant).

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que ω_f n'affecte pas la stabilité du système. Les résultats de simulations réalisée à l'aide du modèle Simscape avec ωf = 200 rad/s, sont illustrés sur la Figure 2.31 (a). Ces résultats confirment que la stabilité du système n'est pas assez affectée par ω_f, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi. Pour comparer des simulations réalisées à l'aide du Simscape avec la valeur nominale de ω_f , sont illustrés sur la Figure 2.31 (b). Comme fait pour les lignes, à t = 5s la valeur de ω_f est augmenté de 15% pour montrer que le système est stable autour de son point de fonctionnement.



(a) (b)

Fig.2.31 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle (les deux DG sont connectés à 0 s et à t = 5 s la valeur de ω_f augmenté de 15%) : (a) avec ω_f=200rad/s. (b) avec ω_f=20rad/s

Pour examiner l'impact de ω_c dans l'équation (2.27), représentant le retard imposé par l'onduleur de source de tension (VSI) contrôlant le DG, sur la stabilité du système, sa valeur est largement diminuée (de sa valeur initiale 1000 rad/s à 50 rad/s). Les valeurs propres les plus sensibles à la variation de ω_c sont λ35 à λ40 ainsi que λ48 et λ49, qui sont deux par deux des nombres complexes conjugués. Comme le montre la Figure 2.32, les parties réelles des valeurs propres impactées se déplacent vers la droite lorsque ω_c diminue et tendent à être positives lorsque ω_c devient inférieur à 50 rad/s, ce qui provoque l'instabilité du système.

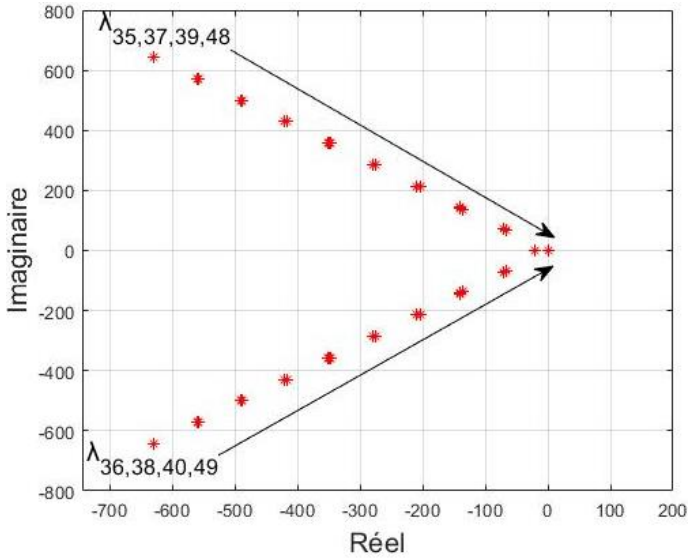


Fig.2.32 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de ω_c (50<ω_c<1000 (rad/s) avec ω_c décroissant).

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que toute valeur de ω_c inférieure à 50 rad/s peut provoquer une instabilité du système. Les résultats de la première simulation, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec ω_c = 50 rad/s, sont illustrés sur la Figure 2.33, et ceux de la seconde simulation avec ω_c =45 rad/s sont présentés sur la Figure 2.34. Ces résultats confirment la stabilité du système pour ω_c > 50 rad/s, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi.

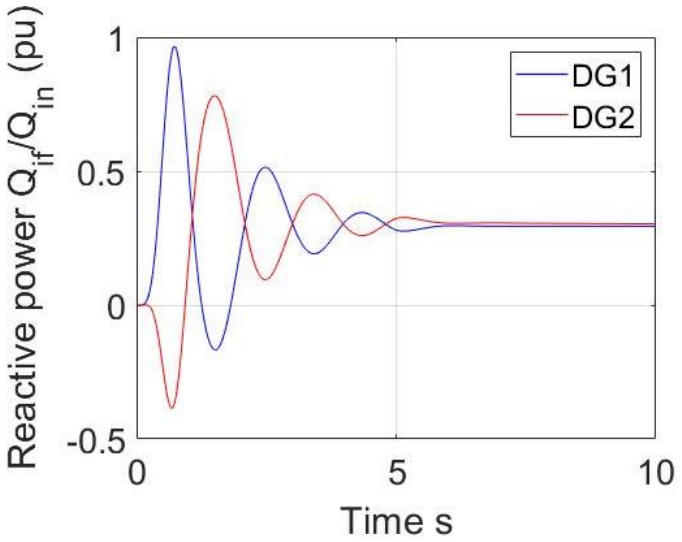


Fig.2.33 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s)) : avec ω_c=50 rad/s.

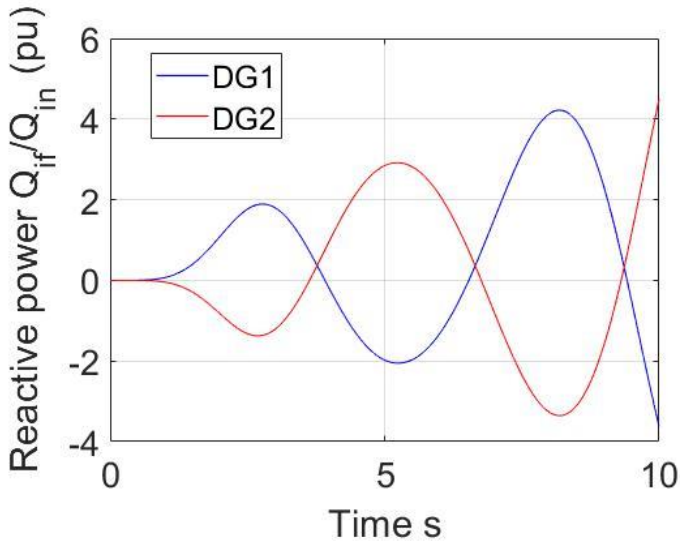


Fig.2.34 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les deux DG sont connectés à 0 s)) : avec ω_c=45 rad/s.

Pour évaluer l'impact des paramètres de contrôle droop sur la stabilité du système, la chute de fréquence Δ_ω est augmentée par 10 pas (de sa valeur initiale à 30 fois cette valeur). Les valeurs propres principalement impactées par cette variation sont λ46 et λ47 ainsi que λ41 et λ42 qui sont des nombres complexes conjugués deux à deux. Comme le montre la Figure 2.35 lorsque Δ_ω augmente, les valeurs propres λ46 et λ47 se déplacent vers la gauche, tandis que λ41 et λ42 se déplacent vers la droite de l'axe réel et deviennent positives pour $\Delta_\omega \geq 15$ rad/s.

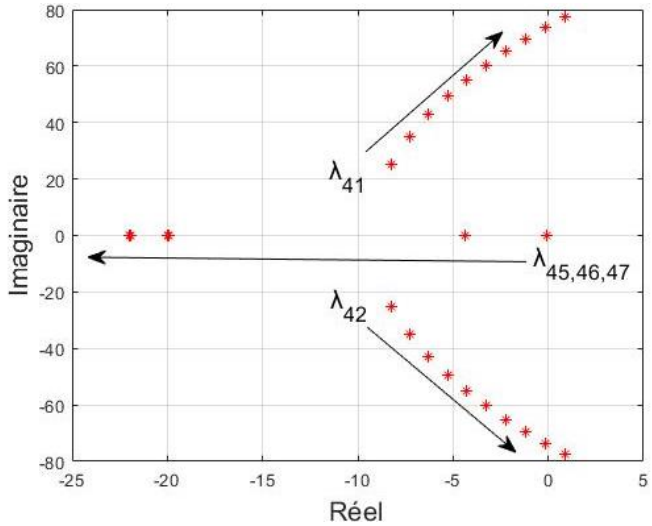


Fig.2.35 Évolution des valeurs propres correspondant à la variation de Δ_ω (0,5 < Δ_ω < 15 (rad/s)) avec Δ_ω croissant.

En suivant la même approche que pour ω_c, des simulations ont été faites pour vérifier que toute valeur de Δω supérieure ou égale à 15 rad/s peut provoquer l'instabilité du système. Les résultats de la première simulation, en utilisant le modèle Simscape avec Δω = 12,5 rad/s, sont illustrés Dans la Figure 2.36, et ceux de la deuxième simulation avec Δ_ω = 15 rad/s sont montrés Dans la Figure 2.37. Ces résultats confirment l'instabilité du système pour $\Delta_\omega \geq 15$ rad/s, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi.

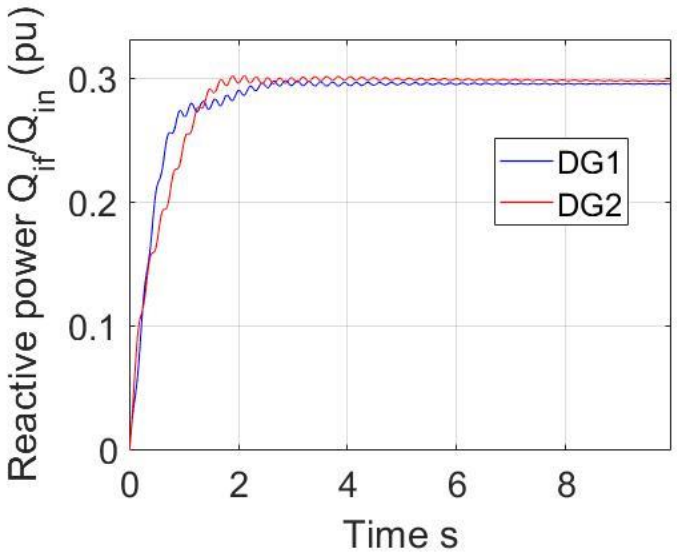


Fig.2.36 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : Δω = 12,5 rad/s

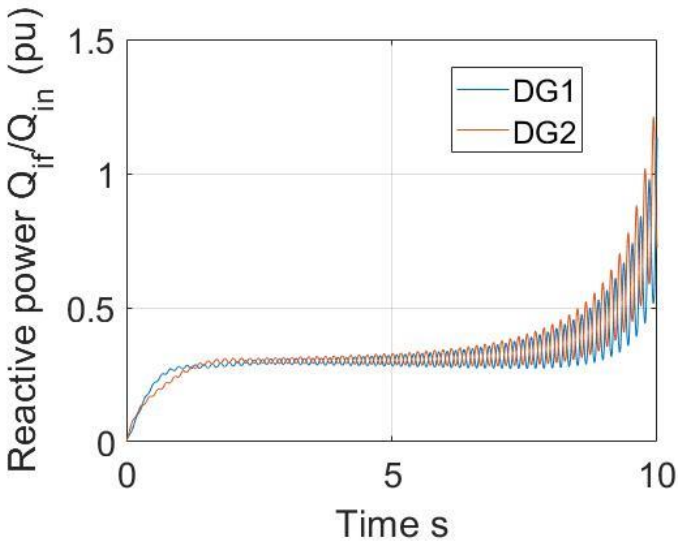


Fig.2.37 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : Δω = 15 rad/s

La chute de tension Δ_E c'est un paramètre des DGs pour lequel son impact sur la stabilité du système est étudié. Pour ce faire, nous avons fait varier Δ_E de sa valeur initiale ($\Delta_E = 6$) à 10 fois cette valeur ($\Delta_E = 60$). Les valeurs propres principalement impactées par cette variation sont λ31, λ32, λ44 et λ45, qui sont les nombres complexes conjugués avec une partie réelle négative ainsi que λ46 et λ46 qui sont des nombres réels négatifs. Lorsque la chute de tension augmente, la figure 2.38 montre que λ44 à λ47 se déplacent vers la gauche tandis que λ31 et λ32 se déplacent vers la droite de l'axe réel et deviennent positives pour $\Delta_E \geq 30$ V.

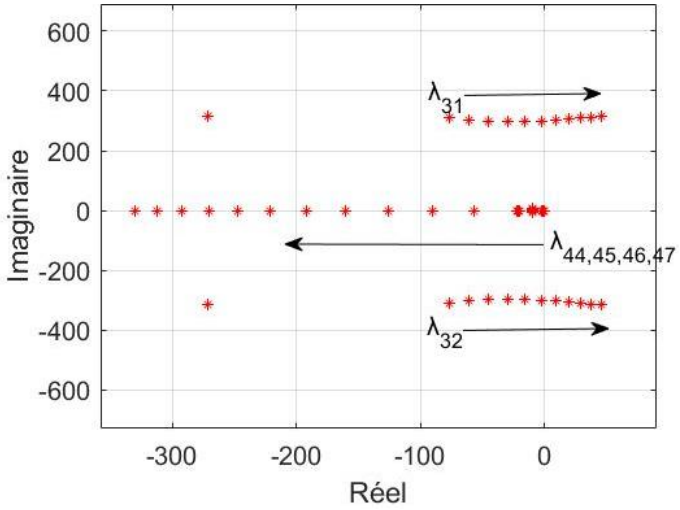


Fig.2.38 Évolution des valeurs propres avec la modification de la chute de tension 6 < Δ_E < 60 (V) avec Δ_E croissant.

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que toute valeur de Δ_E supérieure ou égale à 30 V peut provoquer une instabilité du système. Les résultats de la première simulation, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec Δ_E = 28 V, sont illustrés sur la Figure 2.39, et ceux de la seconde simulation avec Δ_E =30 V sont présentés sur la Figure 2.40. Ces résultats confirment l'instabilité du système pour Δ_E ≥ 30 V, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi.

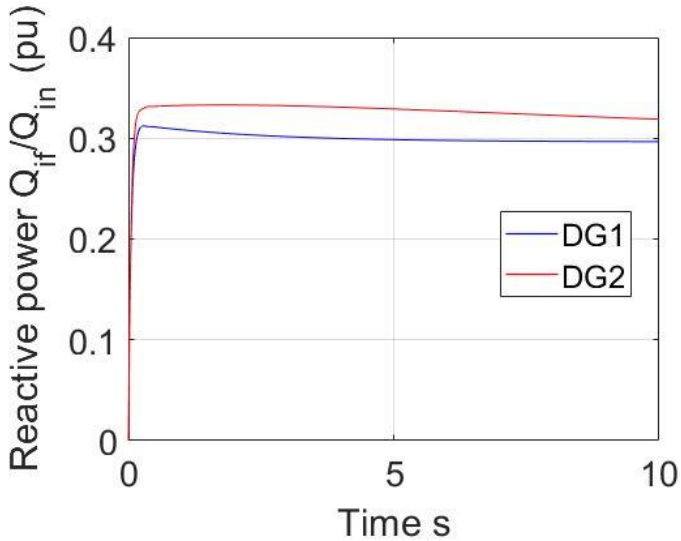


Fig.2.39 Évolution de la puissance réactive des DGs (modèle Simscape, les deux DGs connectés à 0 s) : Δ_E = 28 V

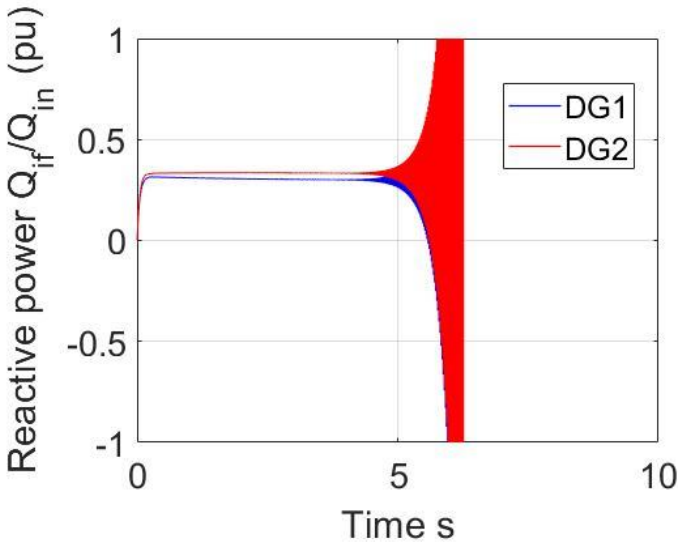


Fig.2.40 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les deux DG connectés à 0 s) : ΔE = 30 V

Ki c'est le dernier paramètre des DGs pour lequel son impact sur la stabilité du système est étudié. Pour ce faire, nous avons fait varier Ki de sa valeur initiale ($Ki = 0.0033$) à 10 fois cette valeur ($\mathrm{Ki} = 0.033$). La valeur λ43 qui fixe la dynamique du système c'est la valeur propre la plus sensible à la variation de Ki. Lorsque Ki augmente, la figure 2.38 montre que λ43 se déplace vers la gauche de l'axe réel et reste toujours négative. Aussi Les pole basse fréquence impactée par la variation de Ki se déplacent de la même manière que les pôles basse fréquence du système simplifié en section 2.2. Ces résultats permettent de voir qu'effectivement la méthode décrite au section 2.2 permet de placer correctement les pôles du contrôleur non linéaire sous réserve de respecter la séparation des dynamiques entre ce contrôleur et la boucle externe de la commande de l'onduleur.

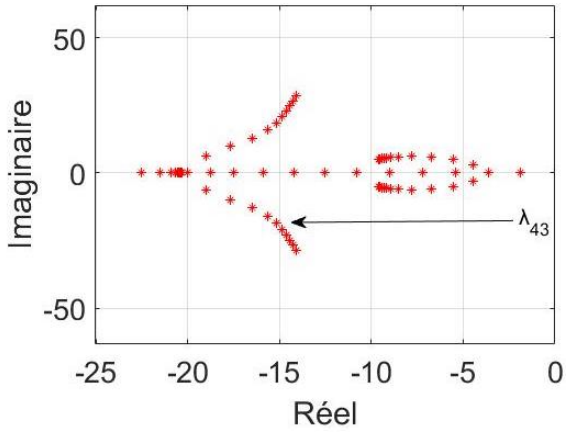


Fig.2.41 Évolution des pôles basse fréquence du modèle complet en fonction des paramètres de commande Ki du contrôleur non linéaire. (Pour Ki=0.0033 à Ki=0.033).

2.4.3. Analyse de la trajectoire des valeurs propres et de la sensibilité pour différentes valeurs des paramètres de charge

Afin d'expliquer l'effet de la variation de la charge sur la stabilité du système, une étude de la variation des trajectoires des valeurs propres dominantes sous différentes conditions de charge est établie.

Concernant les charges R-L en série dans le micro-réseau, l'impact de leurs variations sur la stabilité du système est étudié en analysant l'évolution des valeurs propres principalement impactées par la variation sous facteur de puissance constant de chaque charge RL connectée à un PCC donné. En effet, le facteur de puissance des charges classiques est généralement supérieur à 0,92 et sa variation peut être négligée.

La Figure 2.42 montre l'évolution des valeurs propres principalement impactées par la variation (de la valeur initiale à 50% de cette valeur) des impédances de RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant, respectivement. Les valeurs propres les plus impactées dans ce cas sont λ1 à λ16, qui correspondent aux équations de courant de ligne. On peut remarquer que lorsque la valeur de chaque charge RL diminue sous un facteur de puissance constant, les valeurs propres majoritairement impactées se déplacent vers la droite mais restent suffisamment négatives et n'impactent pas la stabilité du système tant que la variation de charge reste dans la plage de puissance indiquée.

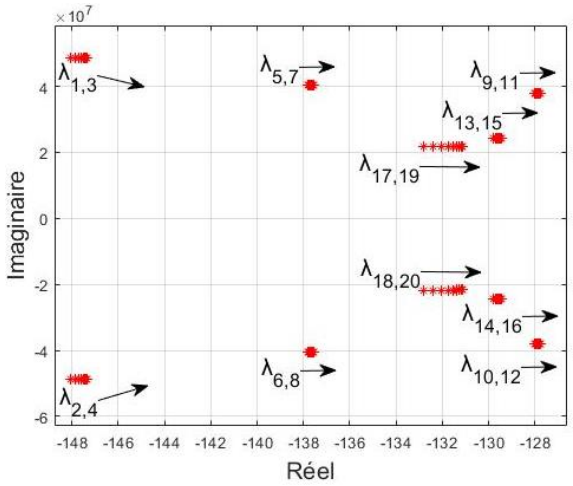
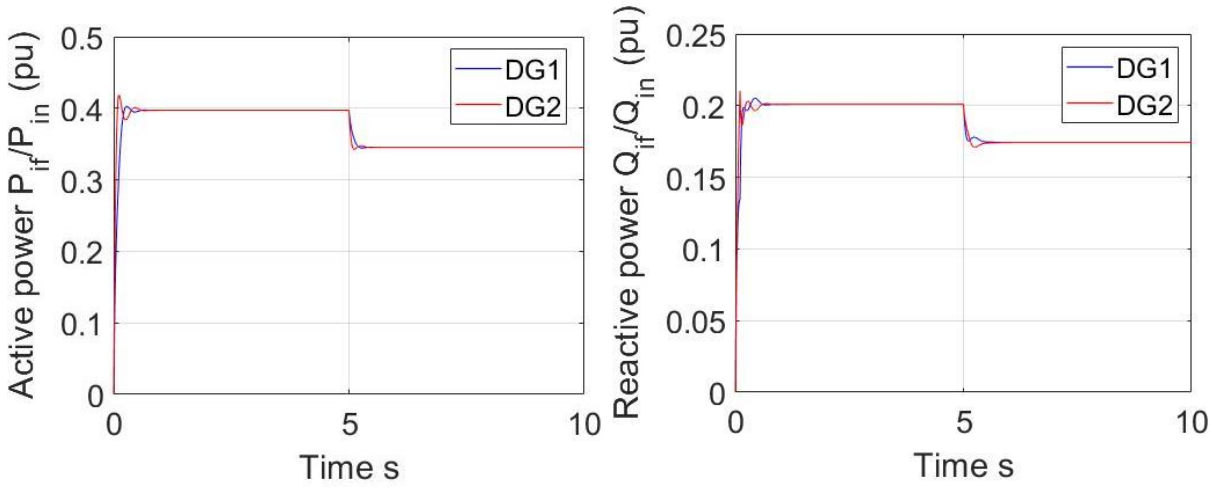


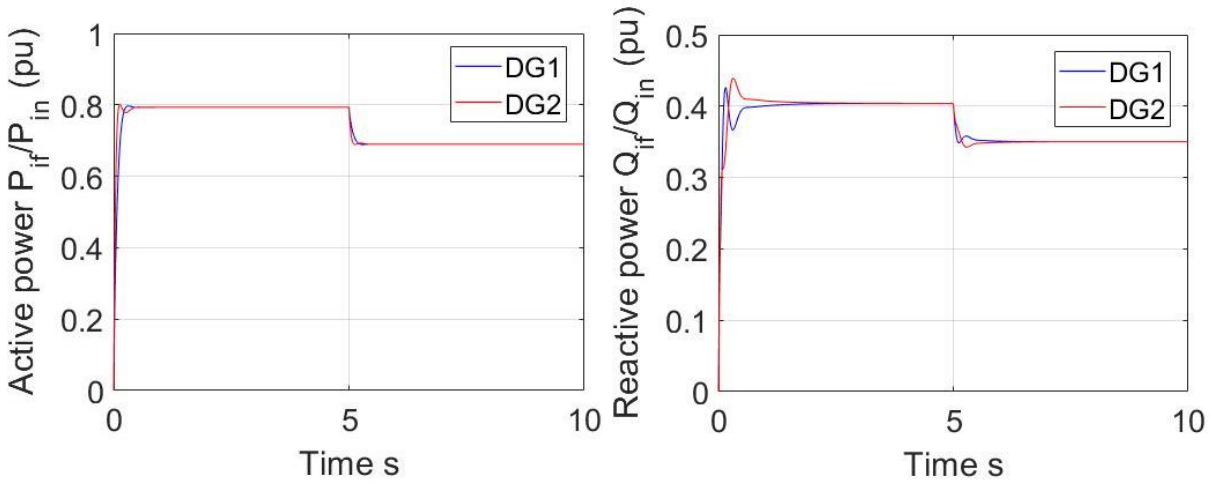
Fig.2.42 Evolution des valeurs propres correspondant à la diminution de RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant.

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que la variation de la charge n'affecte pas la stabilité du système. Les résultats de simulations, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec 2/3 de la charge totale initial et ensuite avec 4/3 de la charge totale initial, sont illustrés sur les Figures 2.43(a), 2.43(b), 2.44(a) et 2.44(b). Ces résultats confirment la stabilité du système après une grande variation de charge, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi. Ils confirment également les résultats des tests de robustesse par rapport aux variations de charge (sections 2.2.3 et 2.2.4). Comme vous pouvez remarquer dans les figures suivantes, à t = 5s les valeurs des paramètres des charges sont baissé de 15% pour montrer que le système est stable autour de son point de fonctionnement.



(a) (b)

Fig.2.43 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les deux DG connectés à 0 s avec 2/3 de la charge totale).



(a) (b)

Fig.2.44 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les deux DG connectés à 0 s avec 4/3 de la charge totale et à t = 5 s les valeurs des charges sont baissé de 15%).

2.4.4. Stabilité du micro-réseau maillé et robustesse de son contrôle en présence des charges à puissance constante (CPL)

Même si le micro-réseau considéré, y compris ses charges et ses DGs, est bien contrôlé, lorsqu'une charge à puissance constante (le CPL) est ajoutée au micro-réseau, la stabilité du système dépend de la puissance active absorbée par le CPL. La figure 2.45 montre un scénario de simulation, comme précédemment, les DGs connectés à 0 s et alimentent les charges R-L connectées au micro-réseau. Une CPL dynamique est connecté en parallèle à la charge 1 (voir Figure 2.46) à t = 5s, absorbant une puissance active de 1 kW et une puissance réactive nulle. La puissance active absorbée par ce CPL est augmentée à 5 kW à t = 7 s. On peut remarquer que la connexion du CPL absorbant 1 kW ne met pas en cause la stabilité du système, mais lorsque la puissance absorbée par la CPL augmente à 5 kW, le système devient instable. Afin de prévoir le niveau de la puissance absorbée par le CPL à partir de laquelle le système devient instable, une solution consiste à ajouter le modèle de charge du CPL au modèle d'état établi et à étudier la stabilité du micro-réseau, incluant la charge du CPL, en calculant les valeurs propres de sa matrice Jacobéenne à chaque point de fonctionnement, comme détaillé ci-après.

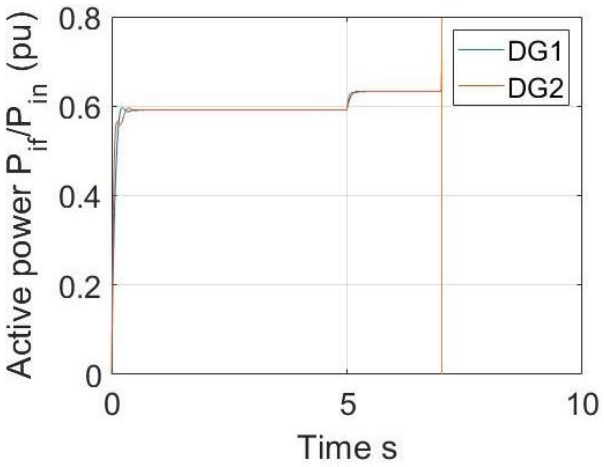


Fig.2.45 Evolution de la puissance active des DG sous différents états de charge (les deux DG connectés à 0 s)

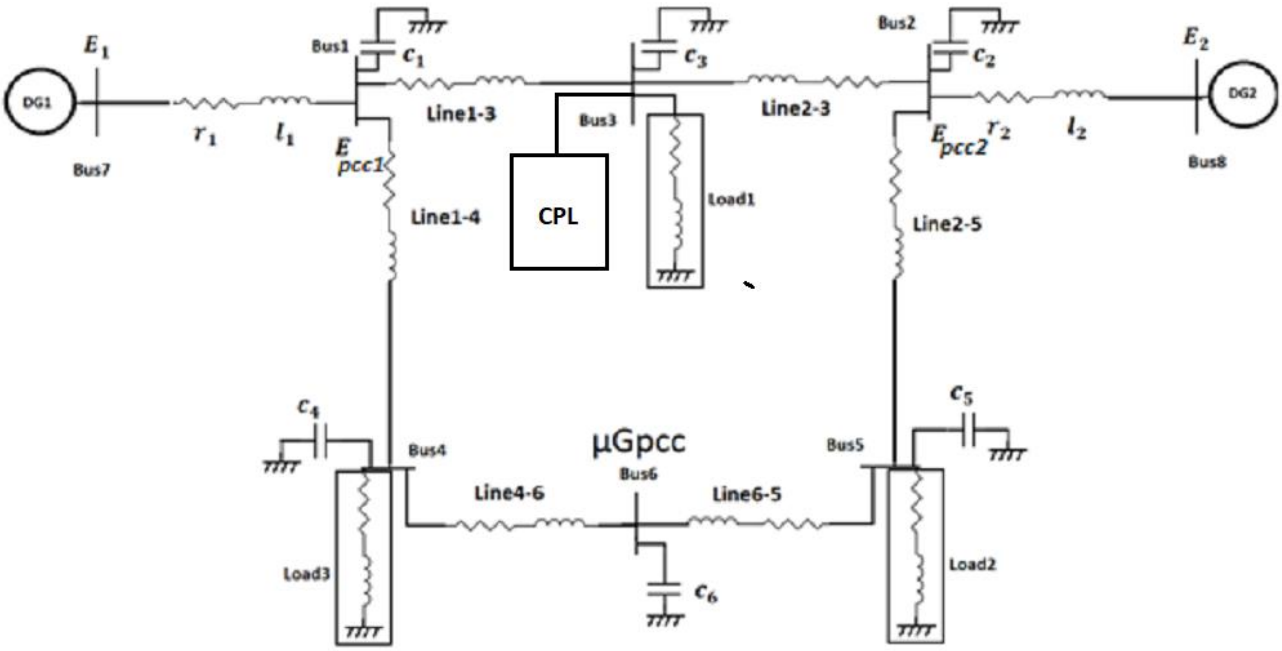


Fig.2.46 Micro-réseau maillé ilote Avec CPL.

2.4.5. Modèle de CPL

i_{CPLid} et i_{CPLiq} sont les composantes d-q du courant absorbé par le i[éme] CPL (CPLi) connecté à i[éme] PCC (PCC$_i$). L'équation non linéaire (2.37) permet de déterminer ces composantes en connaissant les puissances active et réactive P_{CPLi} et Q_{CPLi} absorbées par CPLi.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} P_{CPLi} \\ Q_{CPLi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{i_d} & E_{i_q} \\ E_{i_q} & -E_{i_d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{CPLid} \\ i_{CPLiq} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} i_{CPLid} \\ i_{CPLiq} \end{pmatrix} = \frac{1}{{E_{i_d}}^2 + {E_{i_q}}^2} \cdot \begin{pmatrix} E_{i_d} & E_{i_q} \\ E_{i_q} & -E_{i_d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{CPLi} \\ Q_{CPLi} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2.37)$$

i_{CPLid} et i_{CPLiq} sont ajoutés aux composantes de tension d-q de PCC2 dans l'équation (2.33), on obtient alors (2.38) :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}E_{pcci_d} = \frac{1}{C_{pcci}}\left((\sum i_{ij_d}) - i_{CHi_d} - i_{CPLid}\right) + \omega_{com}\,.\,E_{pcci_q} \\ \frac{d}{dt}E_{pcci_q} = \frac{1}{C_{pcci}}\left((\sum i_{ij_q}) - i_{CHi_q} - i_{CPLiq}\right) - \omega_{com}\,.\,E_{pcci_d} \end{cases} \quad (2.38)$$

2.4.6. Analyse de la trajectoire des valeurs propres et de la sensibilité pour différentes valeurs de CPL

Afin d'expliquer l'effet de la variation du CPL sur la stabilité du système, une étude de la variation des trajectoires des valeurs propres dominantes sous différentes conditions de charge est établie. La figure 47 montre la trajectoire des valeurs propres sous l'effet de la variation de la puissance active Pc absorbée par le CPL. Lorsque la puissance active absorbée par le CPL augmente jusqu'à 10 kW (avec Qc=0 fixé), les valeurs propres λ27 à λ30 sont les plus sensibles au changement de Pc du CPL. Les autres valeurs propres ne varient pas avec l'évolution de Pc.

Comme le montre la figure 2.47, lorsque Qc est fixé à zéro, la valeur limite de la puissance active Pc absorbée par le CPL est de 4.5 kW, au-delà de cette valeur, la partie réelle des valeurs propres λ27 à λ30 devient positive et le système ne peut pas être considéré comme asymptotiquement stable autour du point de fonctionnement considéré.

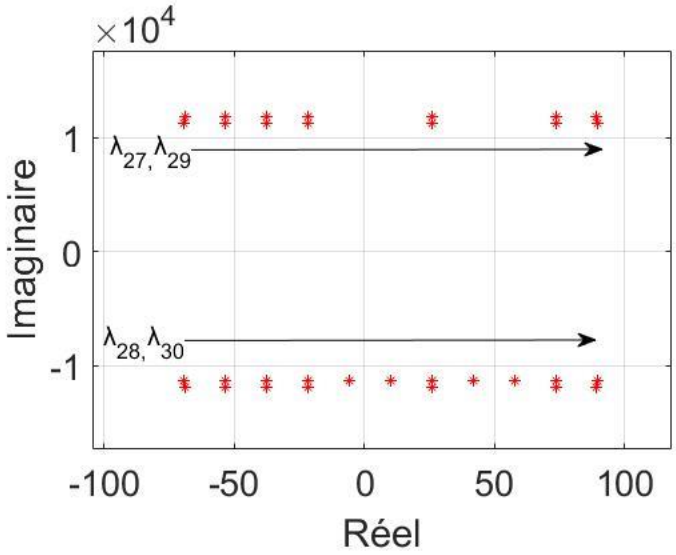


Fig.2.47 Evolution des valeurs propres correspondant à l'augmentation de P_c (1 < P_c < 10 (kW) avec $Q_c = 0\ VAr$).

Pour confirmer les résultats concernant les limites de stabilité imposées par le CPL, les simulations Simscape ont été effectuées pour deux valeurs de la puissance active de la CPL, l'une inférieure à la limite de puissance active (Pc = 4.5 kW) et l'autre supérieure à cette limite (Pc = 5 kW). Les deux DGs connectés à 0 s et le CPL est connecté à t = 5s. Les résultats sont présentés dans les Figures 2.48 (a) et (b) sont en bon accord avec les conclusions tirées du modèle d'état établi concernant l'impact de la puissance absorbée par le CPL sur la stabilité du système considéré.

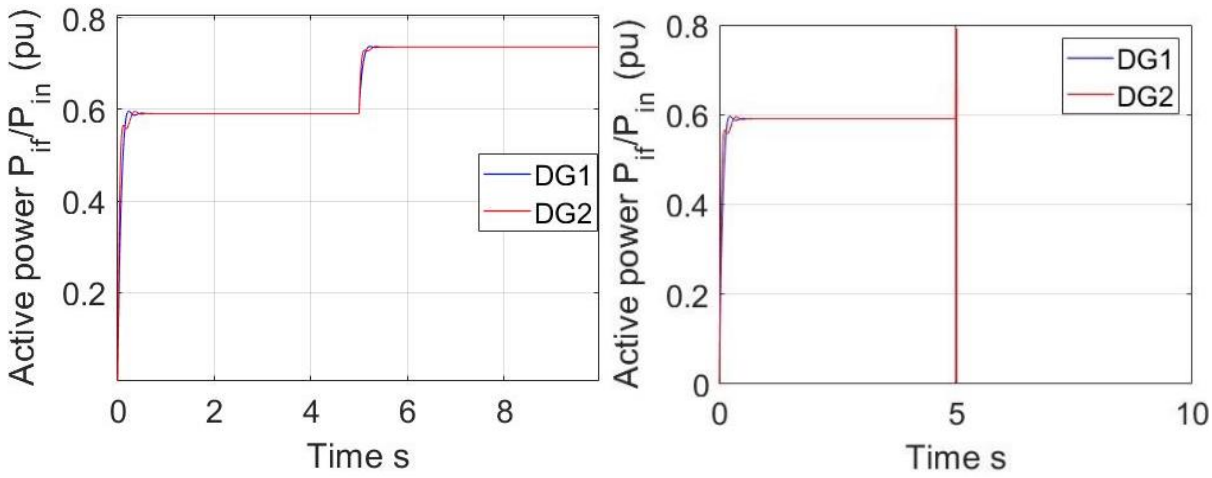


Fig.2.48 Évolution des puissances actives (a) Pc = 4 kW. (b) Pc = 5 kW. (Les deux DG connectés à 0 s et la CPL est connecté t = 5s)

2.4.7. Amélioration de la stabilité

Afin de maintenir la stabilité du micro-réseau pour des valeurs plus élevées de puissance active absorbée par le CPL, une solution consiste à ajouter un condensateur au PCC auquel le CPL est connecté. Ensuite, le modèle d'état établi peut être utilisé pour dimensionner la valeur du condensateur nécessaire pour la puissance active requise du CPL. Pour le micro-réseau considéré, le CPL est connecté au PCC3, et sur la base de l'analyse ci-dessus, la stabilité du système est affectée lorsque la puissance active du CPL devient supérieure à 4,5 kW. Cette dernière limite de puissance active peut être augmentée, par exemple jusqu'à Pc = 7 kW, en imposant une valeur adaptée au condensateur connecté au PCC3. Cette valeur peut être déterminée à l'aide du modèle d'état établi.

Avec la nouvelle valeur de C3 (C3=500 nF), les figures 2.49 (a) et (b) montrent l'évolution des puissances actives des DGs avec une puissance active absorbée par le CPL égale à 7 kW (figure 2.49(a)) et à 8 kW (figure 2.49(b)). Ces résultats confirment que la stabilité du micro-réseau peut être améliorée en utilisant le modèle établi.

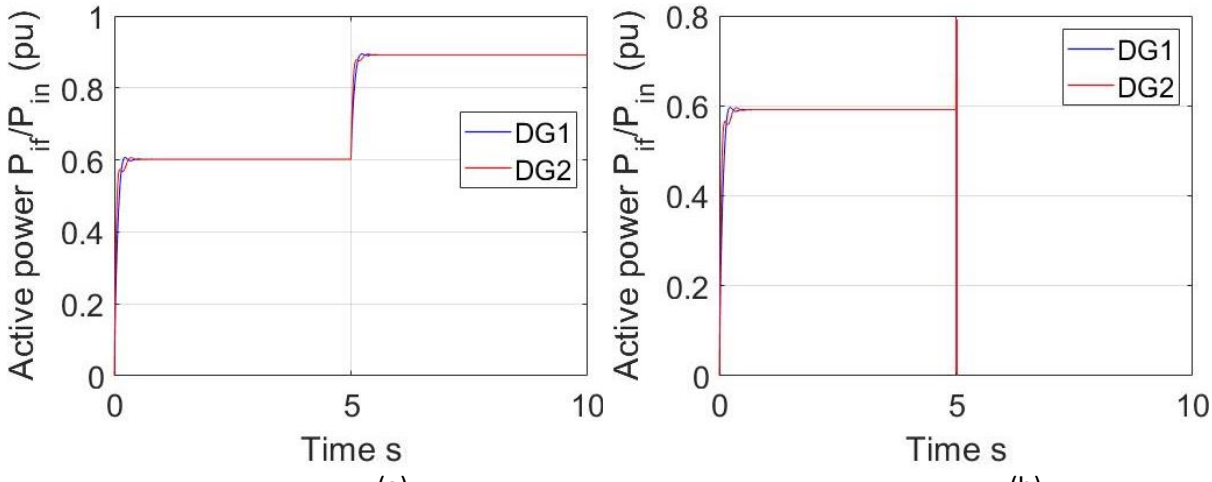


Fig.2.49 Évolution de la puissance active des DG : (a) Pc = 7 kW. (b) Pc = 8 kW. (Les deux DG connectés à 0 s et la CPL est connecté t = 5s) avec C3=500 nF

Chapitre 2 : Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

2.5. Synchronisation et partage des puissances dans les micro-réseaux maillés en mode connecté au réseau.

Pour connecter un micro-réseau au réseau principal au point $\mu Gpcc$ (voir Fig. 2.1-b), il est nécessaire de les synchroniser en adaptant le vecteur tension (de module $E_{\mu Gpcc}$ et d'argument $\delta_{\mu Gpcc}$) au point de connexion $\mu Gpcc$ (voir Fig. 2.1-b) à l'aide des contrôleurs locaux de ses DGs pour qu'ils deviennent pratiquement égaux au vecteur tension ($E_{Gridpcc}$ et $\delta_{Gridpcc}$) au point de connexion côté réseau appelé $Gridpcc$ (voir Fig. 2.1-b). Ceci est réalisé en ajoutant des contrôleurs intégraux purs aux équations de contrôle Droop des DGs de (2.18) et (2.19) déjà utilisées dans la section 2.2.2 pour les micro-réseaux maillés îlotés. La nouvelle stratégie de contrôle pour les micro-réseaux ayant la possibilité de fonctionner à la fois en mode îloté et connecté au réseau est présentée dans (2.39). Dans ces équations, les termes intégraux purs $S3_i$ et $S4_i$, dont les expressions sont données dans (2.40), agissent uniquement pendant l'intervalle de synchronisation. Just après l'interconnexion du micro-réseau au réseau ($t=t_{intercon}$), Les termes $S3_i$ et $S4_i$ sont fixés à leurs valeurs finales atteintes à $t=t_{intercon}$.

En outre, pour contrôler la puissance active échangée après la connexion du micro-réseau au réseau principal (mode connecté au réseau), la stratégie de contrôle des DGs est améliorée, en ajoutant dans l'équation (2.18) de contrôle Droop de i^{ème} DG, un nouveau terme intégral ($Exch_P.D_i$) (voir équation (2.39)). D_i est un coefficient binaire qui est égal à un en mode connecté au réseau et à zéro en mode îloté. L'expression du terme $Exch_P$, donnée dans (2.40), permet de forcer la puissances active échangée (P_{exch}) à sa référence ($P_{exchref}$) sans affecter l'équirépartition des puissances active et réactive entre les DGs. Dans ces conditions, la puissance réactive échangée avec le réseau reste nulle.

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_0 - m_i(P_{fi} - P_{in}) - S1_i.B_i - S3_i + Exch_P.D_i \\ V_i = V_0 - n_i(Q_{fi} - Q_{in}) + J_i(P_{fi} - P_{in}) - S2_2.B_i - S4_i \end{cases} \quad (2.39)$$

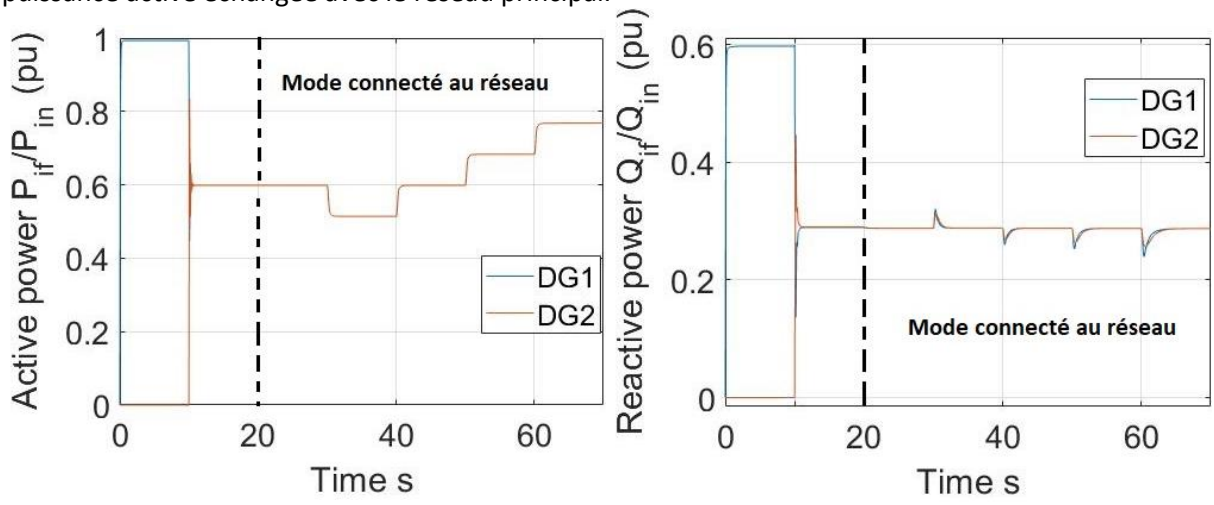
$$\text{Avec:} \quad \begin{cases} S3_i = K_{bi}\int(\delta_{\mu Gpcc} - \delta_{Gridpcc}) \\ S4_i = K_{ei}\int(E_{\mu Gpcc} - E_{Gridpcc}) \\ Exch_P = K_{I1}\int(P_{exchref} - P_{exch})dt \end{cases} \quad (2.40)$$

2.5.1. Résultats de simulation dans les micro-réseaux maillés en mode connecté au réseau.

Pour tester l'efficacité de la commande proposée pour la synchronisation du micro-réseau au réseau principal, le partage des puissances active et réactive entre les DGs ainsi que le contrôle de la puissance active échangée avec le réseau en mode de fonctionnement connecté au réseau, des simulations sont effectuées à l'aide de la boîte à outils Simscape de Matlab/Simulink sur le micro-réseau maillé considéré (figure 2.1-b). Les figures 2.50-a et 2.50-b montrent l'évolution des puissances actives et réactives fournies par les DG1 et DG2. DG1 impose d'abord la fréquence et la tension du micro-réseau maillé îloté et alimente les charges jusqu'à t = 10 s. Après la synchronisation du vecteur de tension de DG2 avec le vecteur de tension du PCC2 (figure 2.1-b) durant l'intervalle 9 s à 10 s, il est connecté au micro-réseau îloté à t = 10 s. Pour la connexion du micro-réseau îloté au réseau principal à t = 20 s, il va être synchronisé durant l'intervalle [19s à 20s]. Pendant l'intervalle [20s à 30s], les puissances active et réactive échangées sont maintenues égales à zéro en appliquant la stratégie de contrôle susmentionnée, exprimée dans (2.39-2.40). La référence $P_{exchref}$ de la puissance active fournie par le réseau principal est d'abord fixée à une valeur positive (2 kW) à t = 30 s, ce qui conduit à la diminution des puissances active fournies par les DGs à puissance de charge consommée fixée. La référence $P_{exchref}$ est ensuite fixée à nouveau à zéro à t = 40 s. Enfin, $P_{exchref}$

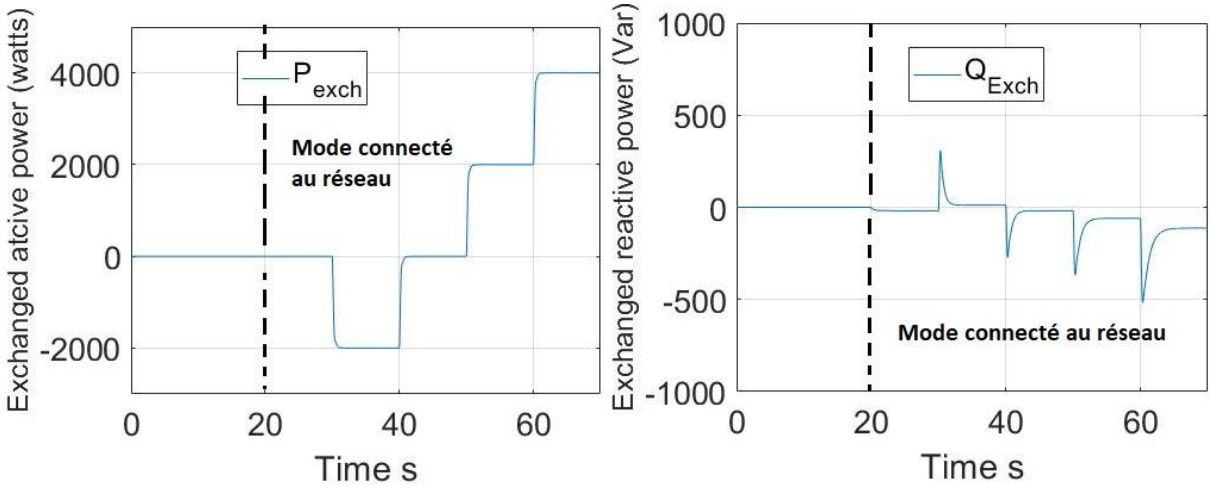
est fixée à -2 kW à t = 50s et à -4 kW à t = 60 s pour transférer une puissance active positive déterminée vers le réseau principal lorsque cela est possible.

On peut remarquer sur les figures 2.50-a et 2.50-b que le partage des puissances active et réactive entre les DGs du micro-réseau dans différents modes de fonctionnement est efficacement assuré, notamment pendant l'intervalle de synchronisation du micro-réseau avec le réseau principal (19s<t<20s) et après leur interconnexion pour t≥20s. De plus, la connexion du micro-réseau au réseau principal à t = 20 s ne provoque pas de pics de puissances active et réactive, ce qui témoigne de l'efficacité de la stratégie de synchronisation proposée et appliquée. On peut également remarquer que sur les figures 2.51-a et 2.51-b, entre 20 s et 30 s, les puissances actives et réactives échangées sont maintenues à zéro, puis la puissance active échangée suit bien ses références comme mentionné ci-dessus. Comme nous n'avons ajouté de terme dans l'équation de tension de 2.39 pour le contrôle de la puissance réactive échangée, elle varie légèrement avec la modification de la puissance active échangée avec le réseau principal.



(a) (b)

Fig.2.50 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DGs (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 20 s). (Simscape)

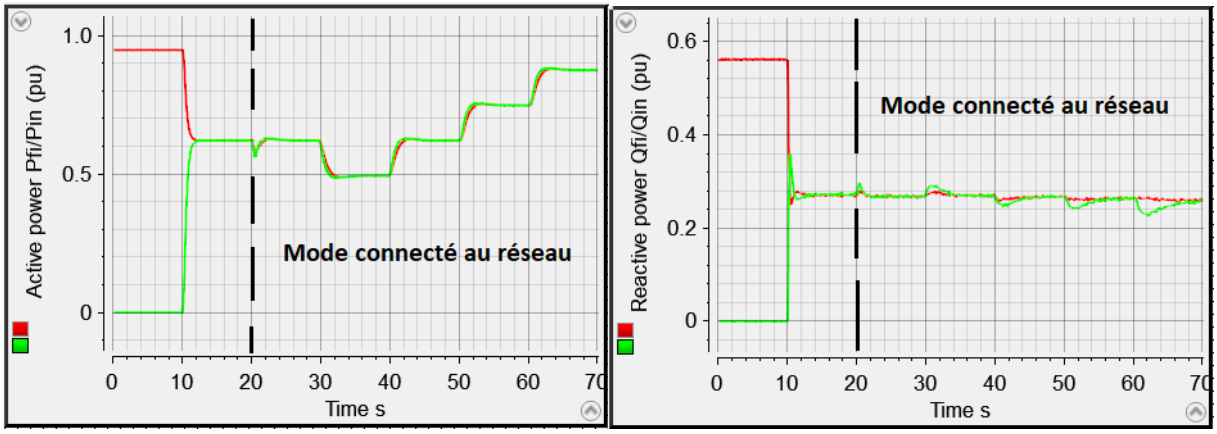


(a) (b)

Fig.2.51 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal. (Smscape)

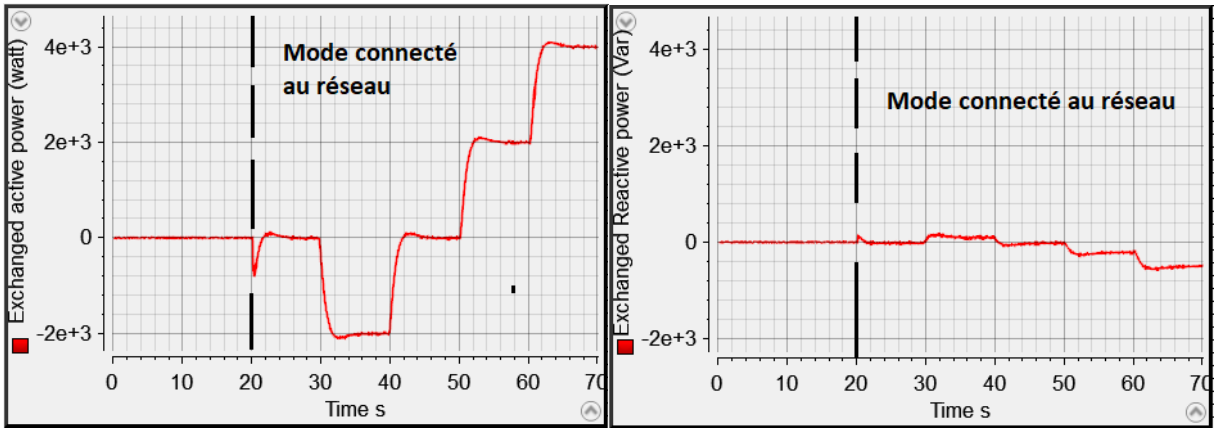
2.5.2. Validation de la commande Droop non-linéaire des DGs du micro-réseau connecté au réseau par la simulation temps réel Hardware-In-the-Loop.

Afin de valider les stratégies proposées (équation 2.39 et 2.40), nous nous basons sur les résultats des tests réalisés par la simulation temps réel HIL. Les mêmes scénarios de simulation qui ont été adoptés dans la section 2.5.1 sont appliqués ici. Comme on peut le remarquer dans les figures 2.52 et 2.53 les résultats sont similaires aux résultats de simulation obtenus à l'aide de simscape dans les figures 2.50 et 2.51, ce qui valident l'efficacité du contrôle Droop non-linéaire proposé pour l'équirépartition des puissances actives et réactives des DGs, la synchronisation du micro-réseaux au réseau principal et sa connexion sans à-coup ainsi que le contrôle de la puissance active échangée en mode connecté au réseau.



(a) (b)

Fig.2.52 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 10 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 10 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 20 s). (HIL)



(a) (b)

Fig.2.53 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal. (HIL)

2.5.3. Étude de robustesse du contrôle du micro-réseau maillé dans les modes de fonctionnement îloté et connecté au réseau.

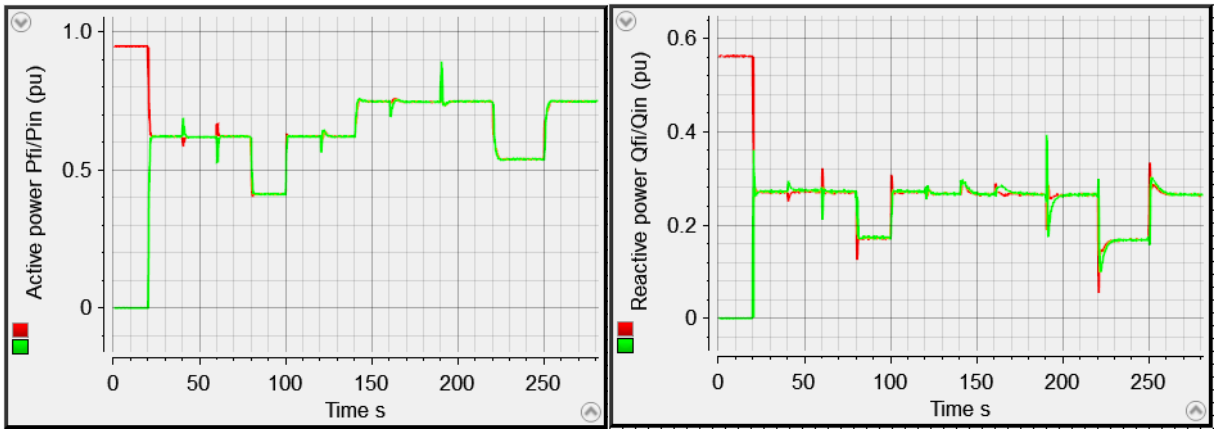
Sur la base du modèle de micro-réseau maillé établi dans NI PXIe-1072, y compris la commande Droop non linéaire proposée établie dans dSPACE, la robustesse de la commande du micro-réseau

maillé considéré (Fig. 2.1-b) par rapport aux grandes variations de charge et aux changements soudains de topologie du micro-réseau est étudiée dans les modes de fonctionnement îloté et connecté au réseau. Dans les deux modes, deux tests de robustesse sont appliqués. Le premier test consiste à déconnecter puis reconnecter une ligne aléatoire dans le micro-réseau, ce qui entraîne une modification de la topologie du micro-réseau. Le second test est l'application d'une grande variation des charges connectées au micro-réseau en déconnectant une de ses charges, suivie de sa reconnexion.

En mode îloté, après la connexion de DG1 et DG2 respectivement à t=0s et t=20s, la ligne 1-4 (Fig. 2.1) est déconnectée à t = 40s puis reconnectée à t=60s. Ensuite, la charge 3 est déconnectée à t=80s et reconnectée à t =100s.

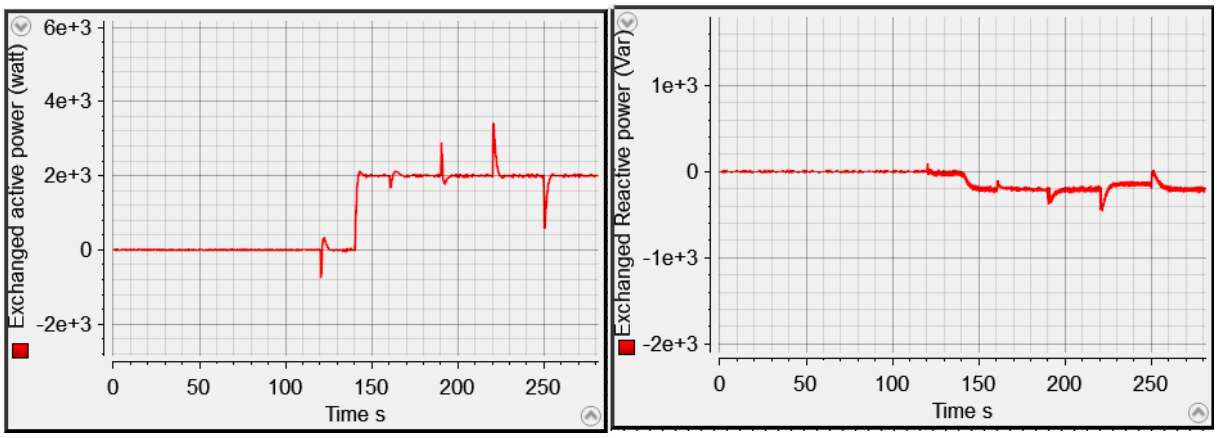
En mode connecté au réseau, l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 120s. La stratégie de contrôle de la puissance échangée est exécutée pour maintenir la puissance active échangée à 0 pendant la période [120s-140s]. En modifiant $P_{exchref}$, à t=140s, une puissance active positive de 2 kW est transférée vers le réseau principal. Pour observer l'effet des changements de topologie sur le contrôle en mode connecté au réseau, la ligne 2-5 est déconnectée à t=160s puis reconnectée à t=190s. Enfin, pour vérifier l'effet d'une grande variation de charge sur le contrôle du micro-réseau connecté au réseau, la charge 2 est déconnectée à t = 220 s puis reconnectée à t=250s.

On peut remarquer sur les figures 2.54(a) et 2.53(b) que dans les deux modes de fonctionnement, îloté (t<120s) et connecté au réseau (t>120s), le partage de la puissance active et réactive reste assuré après les changements dans la topologie du micro-réseau maillé et aussi pendant les grandes variations de charge. On peut également remarquer sur les figures 2.5(a) et 2.54(b) que dans le mode de fonctionnement connecté au réseau, ces tests n'ont pas affecté le contrôle de la puissances active et réactive échangées en régime permanent. L'efficacité de la stratégie de contrôle proposée pour permettre la fonctionnalité plug and play des DGs et des charges tout en assurant un partage précis des puissances actives et réactives entre les DGs, même si la topologie du micro-réseau est dynamiquement modifiée, confirme sa robustesse.



(a) (b)

Fig.2.54 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG sous plusieurs tests de robustesse (le premier DG alimente le micro-réseau îloté jusqu'à 5 s, le second DG est connecté au micro-réseau à 5 s et l'interconnexion entre le micro-réseau et le réseau principal a lieu à 15 s). (HIL)



(a) (b)

Fig.2.55 Evolution des puissances actives (a) et réactives (b) échangées entre le micro-réseau et le réseau principal sous plusieurs tests de robustesse. (HIL)

2.6. Conclusion

Dans un premier temps, une stratégie de contrôle Droop non-linéaire a été proposée et appliquée pour la synchronisation et le partage des puissances active et réactive entre les DGs d'un micro-réseau îloté multi-PCC maillé. L'application de cette stratégie nécessite seulement l'information sur la valeur efficace mesurée de la tension d'un nœud pilote.

Les différents tests de simulation ont prouvé l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée pour la synchronisation rapide ainsi que le partage des puissances active et réactive consommées entre les DGs. Afin de valider la stratégie de contrôle proposée en toute sécurité, des tests HIL (Hardware in the loop) ont été réalisés en utilisant Opal-RT via le système NI PXI et les technologies dSPACE. En utilisant la simulation HIL, toutes les stratégies proposées se sont avérées efficaces.

La robustesse de la stratégie de contrôle proposée par rapport aux modifications soudaines de la topologie et de la charge est vérifiée avec succès en appliquant des tests de déconnexion et de reconnexion des lignes et des charges du micro-réseau maillé considéré en mode de fonctionnement îloté. La seule information requise pour appliquer la stratégie de contrôle proposée est le vecteur de tension mesuré dans un PCC pilote, par lequel le micro-réseau peut être connecté au réseau principal en créant une communication unidirectionnelle. Plusieurs tests considérant différentes valeurs du délai de communication sont effectués pour évaluer son impact sur les performances de la stratégie de contrôle proposée. Les résultats obtenus ont mis en évidence que la stratégie de contrôle proposée est suffisamment robuste face au retard de communication pour être appliquée de manière pratique au contrôle des DGs des micro-réseaux maillés.

Afin d'étudier la stabilité du micro-réseau maillé îloté et la robustesse de son contrôle, un modèle d'état du système complet a été proposé et validé sur la base des résultats de simulation obtenus à l'aide du modèle Simscape et du modèle d'état proposé. Ensuite, l'analyse de stabilité du système non linéaire considéré à chaque point de fonctionnement a été effectuée examinant les valeurs propres de la matrice jacobéenne du modèle d'état établi. L'étude de la sensibilité du système complet (micro-réseau îloté intégrant ses DGs et leurs commandes, ses charges passives et actives) vis-à-vis des variations de ses différents paramètres est réalisé en étudiant l'évolution des valeurs propres de la matrice jacobéenne de son modèle d'état. Il a été constaté que les paramètres du système les plus influents sur sa stabilité étaient les paramètres de contrôle des DG et le niveau de la puissance active du CPL (charges à puissance constante).

Chapitre 2 : Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

La stratégie de commande droop non-linéaire développée est adaptée et utilisée pour le partage de la puissance dans les micro-réseaux maillés connectés au réseau, et la stratégie de synchronisation est également adaptée pour un transfert sans faille du mode de fonctionnement îloté au mode de fonctionnement connecté au réseau. De plus, une nouvelle commande est ajoutée pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives échangées avec le réseau principal (réglage tertiaire). Les résultats de simulation à l'aide de Simscape plus les tests HIL prouvent l'efficacité et la robustesse des stratégies développées.

Les travaux présentés dans ce chapitre montrent que la commande Droop non linéaire proposée permet efficacement d'assurer un partage précis des puissance actives et réactives entre les DGs en agissant sur leurs commandes locales sous condition de recevoir une information concernant la mesure de la tension efficace d'un nœud pilote. Dans ces conditions, les connexion et déconnexions fréquentes liés notamment à l'intermittence des sources à énergies renouvelables peuvent être facilement gérer. Le seul point faible de la stratégie proposé est sa dépendance à une information unique du nœud pilote pour assurer le partage précis des puissance réactives des DGs même si le partage des puissances reste précis. Pour surmonter ce point faible, nous proposons en chapitre 3, une nouvelle approche assurant le contrôle distribuer des DGs des micro-réseaux en se basant sur la théorie de consensus qui n'est pas dépendant d'une même information envoyée à tous les DGs.

Chapitre 2 : Micro-réseaux multi-sources maillés : Equirépartition des puissances et synchronisation

Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

3.1. Introduction

L'objectif principal des micro-réseaux est de maintenir leur tension et fréquence à certaines valeurs de référence, ainsi que d'assurer un partage précis de la puissance active et réactive entre tous les générateurs distribués (DG) au sein du micro-réseau. Cette tâche peut s'avérer difficile, notamment dans les micro-réseaux maillés reconfigurables, en raison du fort couplage entre fréquence et tension. Comme expliqué dans le premier chapitre, il existe de nombreux types de contrôle pour le réglage primaire dans les micro-réseaux, mais ces méthodes de contrôle peuvent être classées en trois catégories : contrôle centralisé, décentralisé et distribué [25].

L'application de la stratégie de contrôle centralisé nécessite une communication bidirectionnelle entre un contrôleur centralisé et les DG, ce qui requiert un système de communication performant en termes de bande passante pour collecter et traiter les informations de tous les DG. Cela augmente la sensibilité du système aux pannes et diminue sa fiabilité, conduisant à un point de défaillance unique.

Quant au contrôle décentralisé, il peut être moins robuste pour les micro-réseaux reconfigurables aux topologies complexes en raison du manque d'informations disponibles au niveau des contrôleurs locaux. Par exemple, le contrôle utilisé dans le chapitre deux pour le contrôle primaire et le partage de la puissance active et réactive des DG est décentralisé et utilise la tension efficace d'un nœud pilote qui est envoyé à tous les DG du micro-réseau. Cela nécessite une communication unidirectionnelle dans le micro-réseau. Bien que cette stratégie de contrôle assure un partage précis de la puissance active et réactive des DG même si certaines lignes, charges ou DG sont connectés ou déconnectés, si une erreur se produit dans la mesure ou la transmission de la tension du nœud pilote, le partage de la puissance réactive de tous les DG est perdu.

Les méthodes de contrôle distribué permettent de surmonter ces limitations. Dans les méthodes de contrôles distribués, chaque DG est contrôlé par un contrôleur dédié qui échange des informations avec ses voisins grâce à un réseau de communication à faible débit. Dans [104], les auteurs proposent un contrôle basé sur la théorie des consensus grâce auquel, en cas de variation de la capacité de puissance maximale d'un DG, tous les DG du micro-réseau estiment la capacité actualisée du micro-réseau puis génèrent leurs puissances de sortie d'une manière distribuée. Bien que la stabilité et la convergence de l'algorithme de consensus soient prouvées, cette stratégie est développée pour les micro-réseaux mono-PCC où tous les DG fonctionnent en parallèle et sont connectés au même bus. Mais son efficacité pour assurer un partage précis de la puissance réactive n'est pas étudiée.

Nous proposons dans ce chapitre une version améliorée de la commande non linéaire proposée dans le chapitre 2. Nous utiliserons la théorie des consensus pour améliorer le contrôle proposé au chapitre II. Le réseau de communication à faible débit utilisé est présenté sur la Figure 3.1.

Dans une première partie, nous élaborerons un algorithme permettant de générer un potentiel de référence commun entre tous les DGs. Ce potentiel de référence commun sera utilisé dans le contrôle non linéaire proposé dans le chapitre 2 au lieu d'une mesure de la tension efficace du nœud pilote qui était envoyée à tous les DG du micro-réseau. Dans ce nouveau contrôle (Figure 3.2), si une erreur se produit dans l'un des bus des DG, seul ce DG perd le partage de la puissance. Les autres DG conservent leur partage de puissance active et réactive.

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

La deuxième partie de ce chapitre traite le contrôle secondaire dans les micro-réseaux pour le rétablissement de la fréquence et de la tension. Le partage de la puissance active et réactive des DG est réalisé par le contrôle primaire de type droop. Mais cela entraîne une déviation de la tension et de la fréquence du micro-réseau par rapport à leurs valeurs nominales, ce qui donne lieu à des problèmes de qualité de l'énergie et détériore le bon fonctionnement du micro-réseau [4], [5]. Ainsi, il est nécessaire de compenser ces déviations par le déploiement d'un contrôle secondaire supplémentaire afin de rétablir la fréquence et la tension de chaque DG à leur valeur nominale [105]-[106]. Comme expliqué pour le contrôle primaire, un contrôle centralisé comprenant plusieurs niveaux de contrôle est largement utilisé dans la littérature [107, 108, 109, 110]. Mais en raison de ses exigences importantes en matière de système de communication, de son manque de flexibilité et de sa vulnérabilité à un point de défaillance unique, l'utilisation d'un contrôle centralisé pour le réglage secondaire n'est pas la solution privilégier dans cette thèse. Par conséquent, un contrôle coopératif distribué basé sur la communication entre contrôleurs locaux capables d'échanger des informations avec les agents voisins (DG) par le biais de réseaux de communication locaux est fortement recommandé en raison de sa grande fiabilité et de son faible coût [5].

De nombreuses stratégies de contrôle secondaire distribué peuvent être trouvées dans la littérature scientifique. Les auteurs de [78], [79] proposent un système robuste de rétablissement de la fréquence et de la tension basé sur la théorie des consensus, ainsi qu'une stratégie de commande pour assurer le partage de la puissance active. Ils se sont focalisés sur les stratégies de communication et de pilotage pour des réseaux reconfigurables. La stratégie est robuste vis-à-vis les incertitudes paramétriques, les perturbations de charge et les délais de communication. Malgré la robustesse de la stratégie proposée, les auteurs ne gèrent pas les échanges de puissances réactives entre DGs et ne tient pas compte de la dynamique du contrôleur primaire qui pourrait diminuer les performances primaires et secondaires et affecter la stabilité du micro-réseau. Les auteurs de [86] proposent un contrôle secondaire coopératif entièrement distribué pour le rétablissement de la fréquence et de la tension d'un micro-réseau avec un partage précis de la puissance active entre les DG. Cependant, [86] n'aborde pas le partage de la puissance réactive entre les DG et les problèmes de robustesse liés notamment aux dynamiques non modélisées.

Pour surmonter ses difficultés, ce chapitre propose un contrôle secondaire entièrement distribué pour le rétablissement de la fréquence et de la tension. Ce contrôle est basé sur un algorithme de consensus qui permet de restaurer la tension et la fréquence sans affecter le partage de la puissance active et réactive des DG. Comme le montre la figure 3.2, le contrôle utilise un réseau de communication local permettant l'échange d'informations avec les agents voisins (DG).

L'efficacité de la commande primaire proposée pour le partage des puissances active et réactive et de la commande secondaire pour le rétablissement de la tension et de la fréquence est vérifiée par des résultats de simulation Simscape et validée par des tests Hardware-In-Loop (HIL) utilisant les systèmes Dspace et opal-rt.

La robustesse des contrôles primaires et secondaires proposés est évaluée à travers des variations de charges, de changements de configurations du réseau et l'introduction de délais de transmission des informations entre DG.

Tout comme pour le chapitre II, un modèle dynamique de l'ensemble du système (figure 3.1) permettra de valider les méthodes de dimensionnement robuste des régulateurs proposés, de faire des analyses de stabilité asymptotique et de robustesse paramétrique.

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

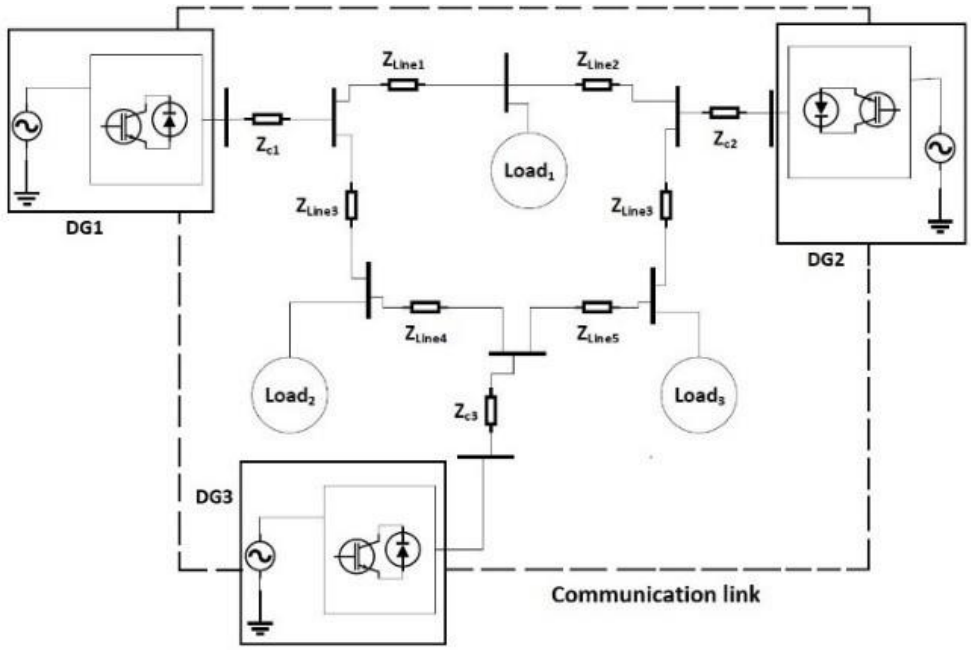


Fig.3.1 Micro-réseau maillé

3.2. Contrôle primaire distribué

3.2.1. Partage de la puissance à l'aide de stratégies de commande Droop

Comme proposé et expliqué dans le chapitre 2, une méthode efficace pour réaliser un partage efficace de la puissance active et réactive entre les DG dans les micro-réseaux maillés îlotés comme celui de la figure 3.1 est de modifier la deuxième équation (équation 3.2) des équations Droop conventionnelles (3.1) et (3.2) en ajoutant un terme de découplage non linéaire $J_i(P_{fi} - P_{in})$, présenté dans (3.3). Ce terme permet de supprimer le couplage physique entre la puissance active (Pij) et la puissance réactive (Qij) qui est causé par la chute de tension due à l'inductance (λi,j) et à la résistance (ρi,j) non négligeables de la ligne reliant les i^{ème} et j^{ième} PCC et par des changements de la topologie du micro-réseau maillé. Le coefficient Ji est estimé à l'aide d'un simple contrôleur intégral, forçant l'annulation de l'erreur ε_i définie dans (3.3). En régime permanent, lorsque l'erreur ε_i tend vers zéro, le partage de la puissance active et réactive est bien assuré entre les DG connectés au micro-réseau.

Il faut noter que la méthode expliquée est décentralisée et ne nécessite que l'information E_{ref} qui est la valeur mesurée de la tension efficace de l'un des Bus du micro-réseau maillé étudié agissant comme nœud pilote et considéré comme son potentiel de référence. La tension nominale de ce nœud pilote est appelée E_n.La tension E_{ref} est mesurée et envoyée à tous les contrôleurs locaux des DG, ce qui crée une communication unidirectionnelle du nœud pilote vers tous les DG.

$$\omega_{iref} = \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) \quad (3.1)$$

$$E_{iref} = E_n - n_i(Q_i - Q_{in}) - J_i(P_i - P_{in}) \quad (3.2)$$

$$\text{Avec:}\begin{cases} J_i = K_i \int \varepsilon_i dt \\ \varepsilon_i = \left[-\alpha\left(\frac{E_{ref}}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{Q_i}{Q_{in}} - 1\right)\right] \\ m_i = \frac{\Delta_\omega}{P_{in}} \\ n_i = \frac{\Delta_E}{Q_{in}} \end{cases} \quad (3.3)$$

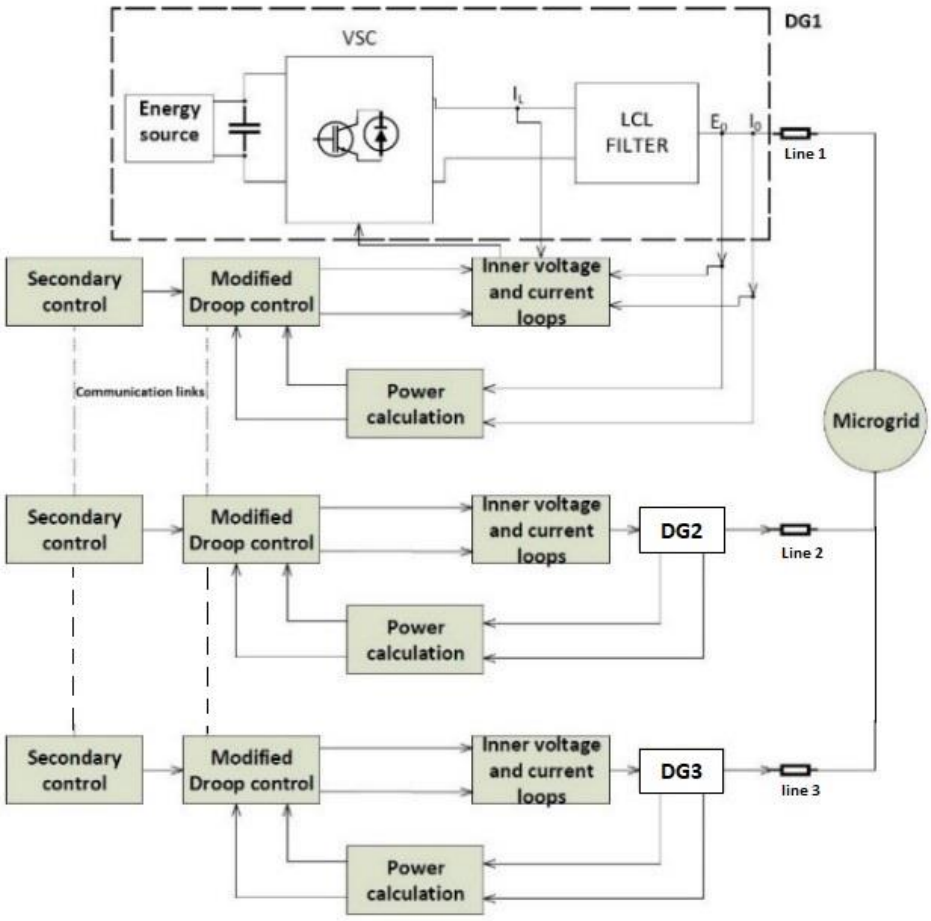


Fig.3.2 Contrôle du micro-réseau

3.2.2. Stratégie de commande Droop basée sur le consensus pour le partage de la puissance

Le contrôle proposé dans le chapitre 2 est efficace pour le partage de la puissance active et réactive dans les micro-réseaux maillés et sa robustesse est prouvée par rapport aux variations de charge et aux changements de topologie du micro-réseau. Mais lorsqu'une erreur se produit sur le bus du nœud pilote où E_{ref} est mesurée, le partage de la puissance réactive de tous les DG est totalement perdu. Afin d'obtenir un potentiel commun servant de référence à chaque contrôleur primaire, un algorithme par consensus est utilisé, qui, à partir de mesures de tension aux points de connexion de chaque DG, va échanger ces informations et construire localement un potentiel commun de

référence noté X_i. Ces valeurs X_i sont utilisées dans la commande non linéaire proposée dans le chapitre 2 au lieu de E_{ref} comme indiqué dans (3.6). Le nouveau contrôle primaire s'écrit alors :

$$\omega_{iref} = \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) \tag{3.4}$$

$$E_{iref} = E_n - n_i(Q_i - Q_{in}) - J'_i(P_i - P_{in}) \tag{3.5}$$

Avec :
$$\begin{cases} J'_i = K_i \int \varepsilon_i dt \\ \varepsilon_i = \left[-\alpha\left(\frac{X_i}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{Q_i}{Q_{in}} - 1\right)\right] \\ m_i = \frac{\Delta_\omega}{P_{in}} \\ n_i = \frac{\Delta_E}{Q_{in}} \end{cases} \tag{3.6}$$

Le prédimensionnement de α et K_i est identique à celui détaillé au chapitre 2.

- Graphe de réseau et matrice Laplacienne associée

  Le réseau de communication peut être modélisé par un digraphe G = (V, $\mathcal{E}$) constitué d'un ensemble d'agents finis non vides $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_N\}$ et d'un ensemble de liens de communication E ⊂ V × V, appelés arêtes. Une arête dans G est désignée par (v_i, v_j).

  si $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$, alors les agents v_i et v_j sont adjacents (ou voisins) et peuvent obtenir des informations les uns des autres. L'ensemble des voisins des nœuds v_i est défini comme $N_i = = \{v_j \in V : (v_j, v_i) \in \mathcal{E}\}$. Les auto-éléments ne sont pas autorisés, c'est-à-dire que $(v_i, v_i) /\in \mathcal{E}$. Un chemin dans un graphe de v_i à v_j est une séquence d'arêtes de la forme (v_i, v_{i+1}), (v_{i+1}, v_{i+2}), . . ., (v_{j-1}, v_j). La matrice d'adjacence A = $[a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N\times N}$ de G est définie par $a_{ij} = a_{ji} = 1$ if $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$ et 0 dans les autres cas. La matrice laplacienne $\mathcal{L} = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{N\times N}$ de G est définie par $l_{ij} = -a_{ij}$, pour $i \neq j$ et $l_{ii} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}$ pour tout i ∈ {1, ..., N}. Pour ce chapitre, le graphe du réseau est présenté dans la figure 3.3 et la matrice Laplacienne associée est présentée dans (3.7). DG1 et DG2 ainsi que DG2 et DG3 communiquent directement mais DG1 et DG3 communiquent à travers DG2.

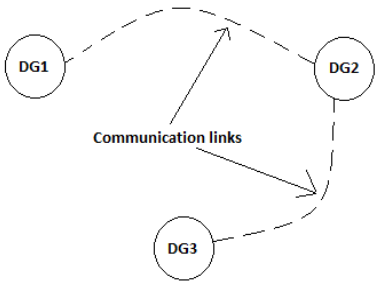


Fig.3.3 Graphe du réseau de communication

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Remarque : une propriété importante de la matrice Laplacienne $\mathcal{L}$ est que, en posant N le nombre de noeuds, $I_N^T \mathcal{L} = 0 \; et \; \mathcal{L} I_N = 0$

- Détermination des potentiels de référence X_i à l'aide d'un algorithme par consensus :

  Comme expliqué précédemment, l'algorithme de consensus est défini par les équations (3.8) et (3.9). Si un régime établi existe, alors la relation (3.10) en régime permanent assurera que tous les potentiels de référence des trois DG (X_i) convergent vers la même valeur en régime permanant. Cette valeur est fixée par le maître et sera égale à E_1. Le maître est choisi comme étant le DG1 en définissant la matrice J telle que proposé en (3.9).

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = K_x \begin{bmatrix} E_1 - X_1 \\ E_2 - X_2 \\ E_3 - X_3 \end{bmatrix} - K_y \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{3.8}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = (\mathcal{L} + J)\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} - J\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \\ J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{3.9}$$

- Analyse au point d'équilibre en régime permanent

L'équation (3.9) implique alors que :

$$0 = (\mathcal{L} + J)\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} - J\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \rightarrow X_1 = X_2 = X_3 = E_1 \tag{3.10}$$

En régime permanent les variables X_i vont toutes converger vers la tension E1 ce qui permettra de garantir une équi-répartition des puissances réactives.

- Prédimensionnement de K_x et K_y pour la mesure du potentiel commun

  La topologie du micro-réseau est supposée inconnue. Ainsi, l'utilisation d'une représentation de l'espace d'état pour analyser la stabilité asymptotique globale du système n'est pas possible. Pour proposer un dimensionnement des paramètres de contrôle indépendamment des paramètres ou de la topologie du micro-réseau, nous imposons que la dynamique de la variable d'état X_i soit lente par rapport à la dynamique du terme intégral J_i. Ainsi, grâce à cette séparation des dynamiques, ε_i peut-être supposé nul. (3.8-3.9) étant des équations linéaires, il vient après transformations de Laplace (3.11) :

$$\begin{aligned} & s(sI + K_x)X = sK_xE - K_y\big((\mathcal{L} + J)X - JE\big) \\ & \rightarrow \Big(s^2I + sK_x + K_y(\mathcal{L} + J)\Big)X = \big(sK_x + K_yJ\big)E \end{aligned} \tag{3.11}$$

  Nous définissons K_x et K_y comme des matrices diagonales égales respectivement à k_xI_3 et k_yI_3. Ainsi, les pôles du système sont déterminés en évaluant les zéros de P(s) avec :

$$\mathrm{P(s)} = \det\left[s^2I + sK_x + K_y\,(L + J)\right] \tag{3.12}$$

  Une procédure de placement des pôles est utilisée pour déterminer les valeurs de K_x et K_y identiques pour tous les générateurs distribués. La procédure de placement des pôles est effectuée en faisant varier K_x et K_y en évaluant les zéros de (3.12) comme le montre la figure 3.4. La conception des paramètres dépend seulement des matrices $\mathcal{L}$ et J rendant la synthèse indépendante de l'architecture électrique du micro-réseau.

Sur la base de la méthode de placement des pôles adoptée, la combinaison de K_x, K_y qui donne le comportement le plus stable pour le système est : $K_x = 3\ et\ K_y = 11$.

Remarque : Une synthèse distribuée indépendante du réseau de communication peut être effectuée en ne conservant que les termes diagonaux de la matrice $L + J$, la dynamique de convergence n'étant alors pas complétement maitrisée en raison du couplage (négligé) avec les autres DG.

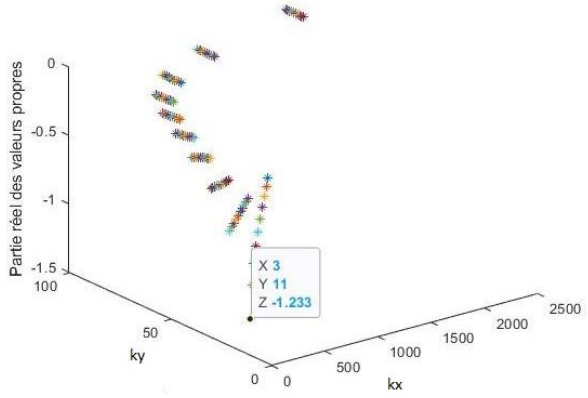


Fig.3.4 Procédure de placement des pôles

3.2.3. Résultats des simulations

Afin de montrer l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée pour le partage de la puissance dans les micro-réseaux maillés, des simulations sont effectuées à l'aide de la boîte à outils Simscape de Matlab/Simulink. Chaque source, Source 1 (DG1), Source 2 (DG2) ou Source 3 (DG3) du micro-réseau maillé de la figure 3.1, est modélisée par une source de tension triphasée contrôlée par E_{abcref_i} qui est générée en utilisant la stratégie de Droop modifiée. La dynamique des boucles internes du VSI est supposée être largement plus rapide que la dynamique des contrôles primaires/secondaires et a été négligée. Comme le montre la figure 3.1, les DG1, DG2 et DG3 sont connectés respectivement aux Bus1, Bus2 et Bus3. Pour les simulations effectuées, les principaux paramètres du micro-réseau sont présentées dans le tableau 3.1 et les puissances nominales des DG et des charges sont présentées dans le tableau 3.2. Tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0 s, imposant la fréquence du micro-réseau ainsi que la tension de chaque bus et alimentant les charges connectées tout en appliquant la commande conventionnelle de droop jusqu'à t = 10 s. A t = 10s, la commande non linéaire proposée dans (3.4) et (3.5) pour le partage de la puissance est appliquée. On peut voir sur les figures 3.5a que les potentiels de référence des trois DG X_i convergent vers la valeur de la tension de sortie du master E1 après l'application du consensus à t= 10 s. On peut aussi voir sur les figures 3.5b, c que le partage de la puissance active et réactive est bien assuré, ce qui prouve l'efficacité de la commande proposée pour le partage de la puissance active et réactive dans les micro-réseaux maillés îlotés.

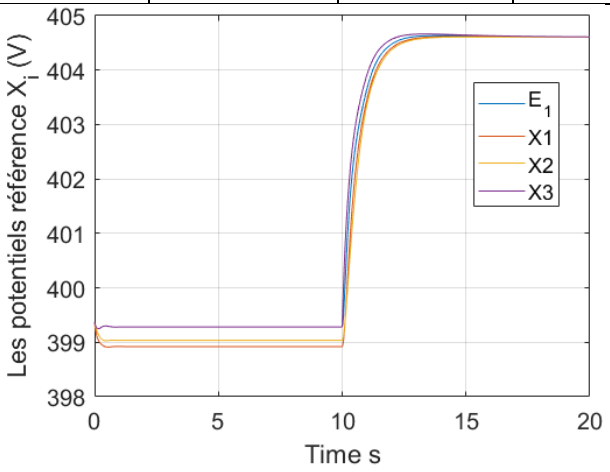
Table 3.1 Paramètres des lignes de transport du micro-réseau considéré

Lines	Resistance (Ω)	Inductance (mH)	capacitance (µF)
Line 1	0.63	7.14	205
Line 2	2.55	11.4	230

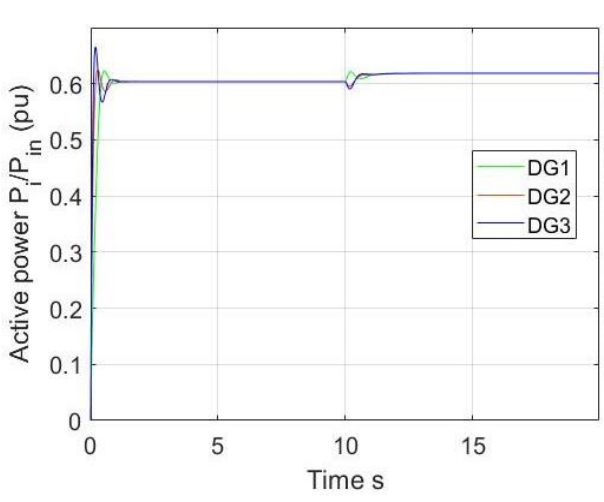
Line 3	0.63	7.14	205
Line 4	2	7	180
Line 5	1.7	7.6	153.4
Line 6	1.7	7.6	153.4

Table 3.2 Puissances des sources et des charges

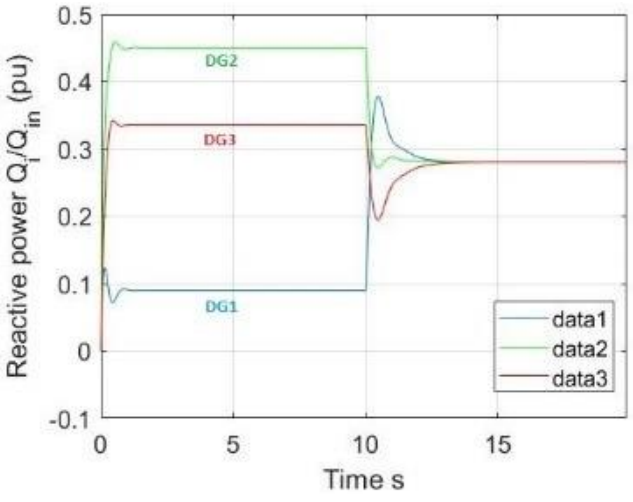
Sources and loads	Active power (Kw)	Reactive power (Kvar)	Phase to pahse voltage (V)
Source 1	10	4	400
Source 2	6	2	400
Source 3	4	1	400
Load 1	3	0.5	400
Load 2	2.5	0.5	400
Load 3	6	0.75	400



(a)



(b)



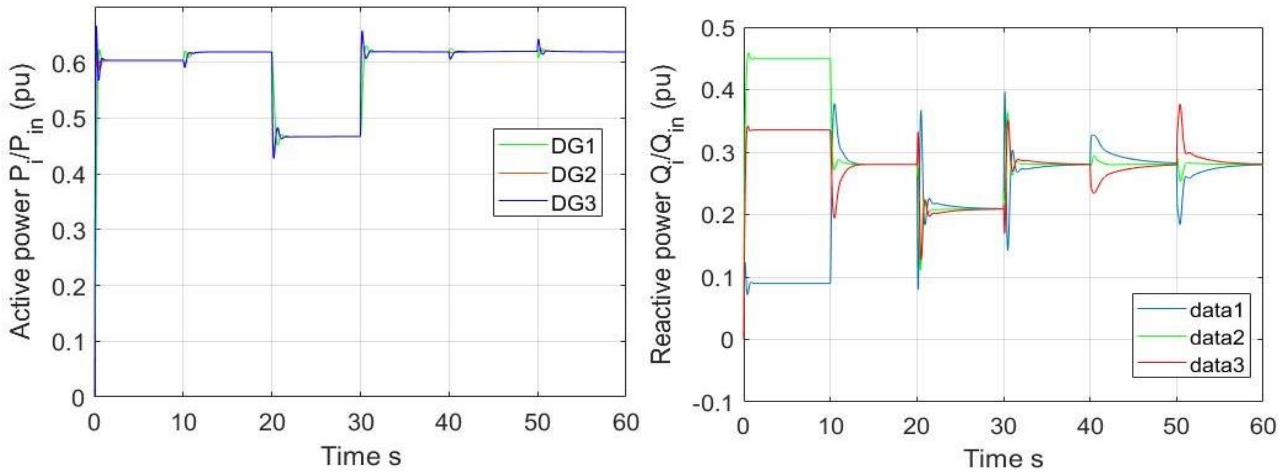
(c)

Fig.3.5 Évolution des potentiels de référence (a), puissances actives (b) et réactives (c) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s)

3.2.4. Robustesse du contrôle primaire

Pour tester la robustesse du contrôle proposé par rapport aux variations de charge et aux changements de topologie du micro-réseau maillé, après l'application du contrôle non linéaire à 10 s, la charge 2 est déconnectée à t = 20s et reconnectée à t = 30s. Ensuite, pour tester l'effet des changements de topologie, à 40 s la ligne 5 est déconnectée et reconnectée à t = 50s.

On peut remarquer sur les figures 3.6a, b que le partage de la puissance active et réactive est maintenu même après la déconnexion et la reconnexion d'une charge et d'une ligne électrique, ce qui montre la robustesse du contrôle proposé par rapport aux changements de topologie et aux variations de charge.



(a) (b)

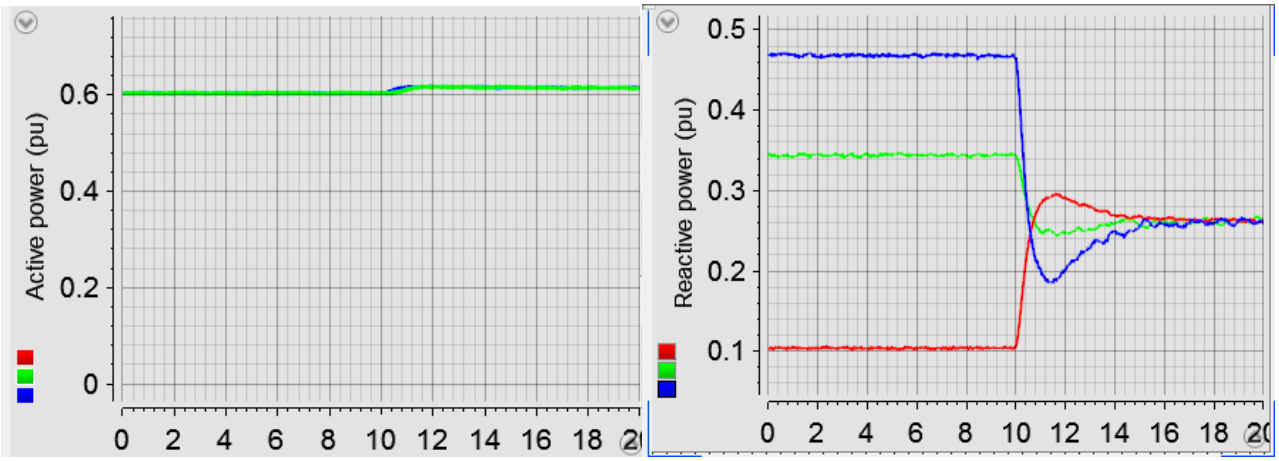
Fig.3.6 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de type droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s)

3.2.5. Validation à l'aide de simulations en temps réel Hardware In the Loop

La même stratégie de validation HIL utilisée dans le chapitre 2 est utilisée ici.

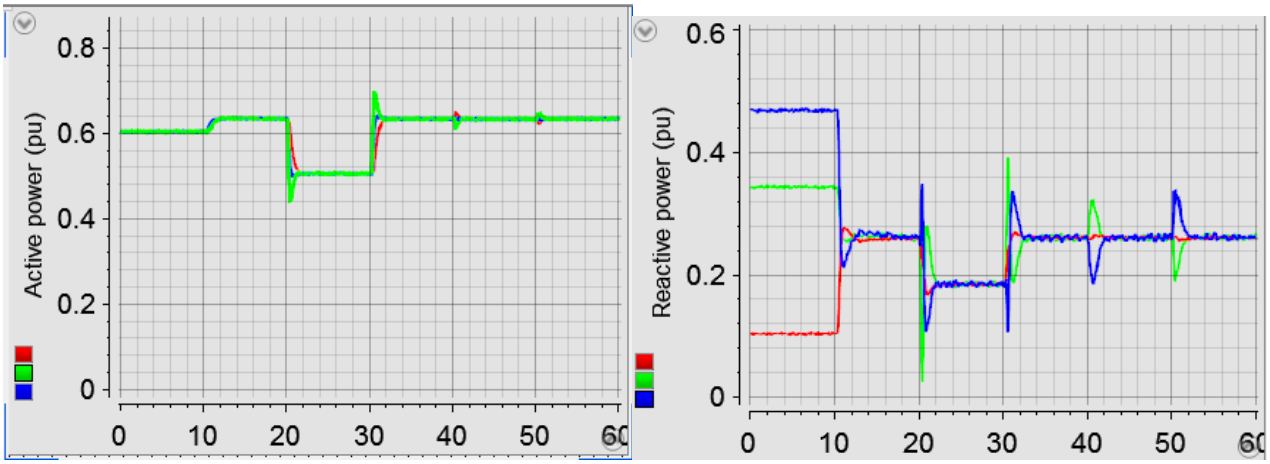
Afin de valider les stratégies proposées pour le partage de la puissance des DG en mode îloté, les figures 3.7a, b montrent l'évolution des puissances active et réactive fournies par les DG1, DG2 et DG3. Tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0 s imposant la fréquence du micro-réseau ainsi que la tension de chaque PCC et alimentant les charges connectées au micro-réseau tout en appliquant la commande conventionnelle de droop jusqu'à t = 10 s. A t = 10s la commande non linéaire proposée pour le partage de puissance est appliquée. On peut constater que le partage de la puissance active et réactive est bien assuré. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par les résultats de simulation par simscape pour le partage de la puissance dans les micror-éseaux maillés îlotés.

Afin de valider la robustesse de la commande, on procède aux mêmes essais que ceux réalisés pour la simulation Simscape précédente. Les résultats sont en adéquation avec les résultats de simulation obtenus précédemment. L'effet du découpage et des boucles d'asservissement internes des DG est bien négligeable avec le dimensionnement effectué.



(a) (b)

Fig.3.7 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de type droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s). Bleu DG1, vert DG2 et rouge DG3



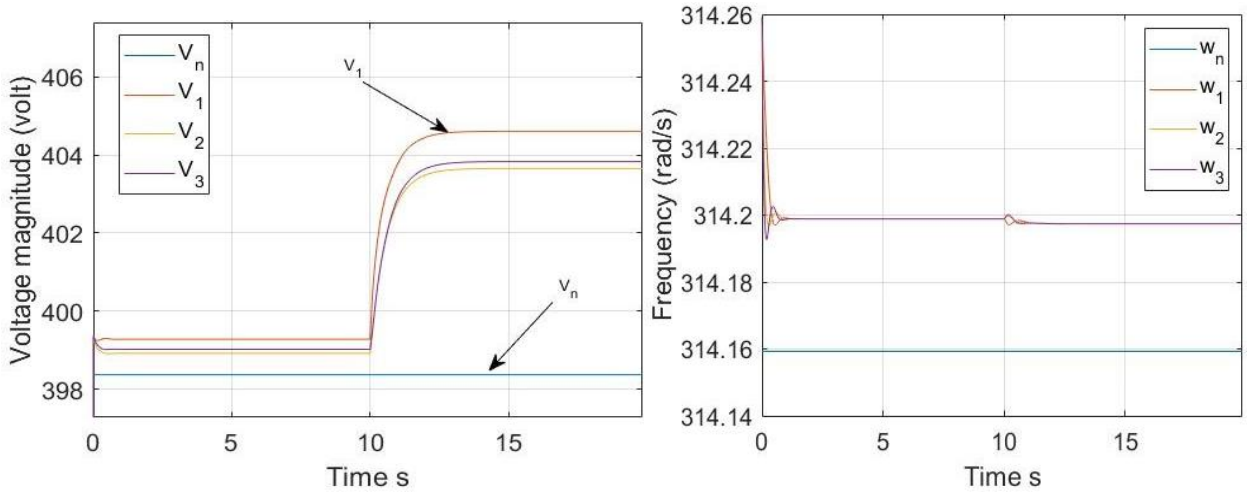
(a) (b)

Fig.3.8 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (tous les DG sont connectés au micro-réseau à 0s tout en appliquant la commande conventionnelle de droop. Le contrôle non-linéaire est appliqué à 10s). Bleu DG1, vert DG2 et rouge DG3

3.2.6. Effets du contrôle primaire sur la fréquence et l'amplitude de la tension du micro-réseau

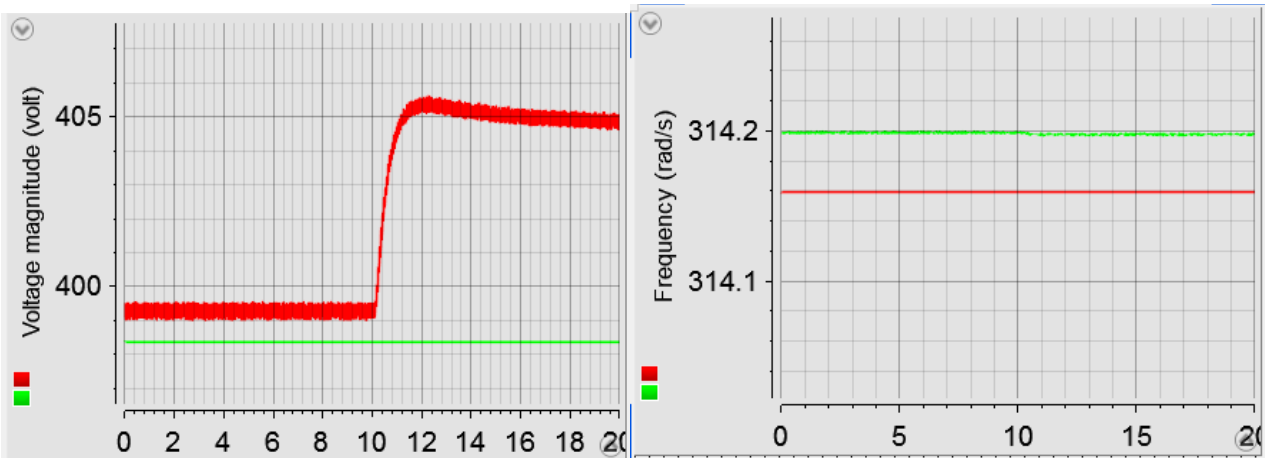
Le contrôle primaire utilisé dans ce chapitre conduit à un partage parfait de la puissance active et réactive. Cependant, comme la plupart des contrôles primaires utilisant la stratégie de contrôle Droop, il peut provoquer des déviations de tension/fréquence par rapport à leurs valeurs nominales, comme le montrent les simulations sur les figures 3.9a, b, résultat confirmé par la validation HIL

présenté sur la figure 3.10a, b. On peut voir qu'en raison du contrôle primaire, la fréquence et la tension s'écartent de leurs valeurs nominales. Surtout la tension qui présente une plus grande déviation due à la commande non linéaire pour le partage de la puissance réactive à t ≥ 10s. Par conséquent, une commande secondaire pour le rétablissement de la tension et de fréquence basée sur une approche par consensus est proposée dans la section suivante.



(a) (b)

Fig.3.9 Evolution de la tension des DG (a) et de la fréquence (b). (Le contrôle non linéaire est appliqué à 10s).



(a) (b)

Fig.3.10 Evolution de la tension du DG1 (a) et de la fréquence (b). (Le contrôle non linéaire est appliqué à 10s).

3.3. Contrôle secondaire distribué

Dans cette section, nous proposons un contrôle secondaire distribué qui vise à rétablir la fréquence et la tension à leurs valeurs nominales après leurs déviations dues au contrôle primaire. Ce contrôleur secondaire est conçu pour être compatible avec le contrôleur primaire déjà proposé (et en particulier le contrôleur pour le partage de la puissance réactive) discuté précédemment.

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

3.3.1. Régulation de fréquence distribuée et partage de la puissance active

Le contrôle distribué que nous proposons vise à forcer toutes les fréquences des DG à converger vers la même valeur en utilisant le contrôle basé sur le consensus présenté dans (3.22), (3.23) et (3.24) tout en forçant les erreurs $(\omega_i - \omega_n)$ à converger vers zéro. Cela permet de rétablir les fréquences de tous les DG à leurs valeurs nominales sans affecter leur partage de puissance active. Le contrôleur droop en fréquence est modifié. Le terme $X_{\omega i}$ défini par (3.25) est ajouté à (3.13) pour obtenir le nouveau contrôle Droop de fréquence donnée par (3.22).

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \omega_f(-\omega_i + \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) - X_{\omega i}) \tag{3.22}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \omega_f\left(-E_i + E_n - \frac{\Delta_E}{Q_{in}}(Q_i - Q_{in}) - J'_i(P_i - P_{in})\right) \tag{3.23}$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} J'_i = K_I \int \varepsilon_i dt \\ \varepsilon_i = \left[-\alpha\left(\frac{X_i}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{Q_i}{Q_{in}} - 1\right)\right] \end{cases} \tag{3.24}$$

$$\left\{\frac{d}{dt}X_\omega = -\mathcal{L}K_1X_\omega + K_2(\omega - \omega_n I_3)\right. \tag{3.25}$$

Avec : $I_3 = [1\ 1\ 1]^t$; $k_\omega = K_1 I_3$, $X_\omega = [X_{\omega 1} \quad X_{\omega 2} \quad X_{\omega 3}]^T$, $\omega = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3]^T$, $\{K_1, K_2\} \in R^2$

En régime permanent, toutes les pulsations ω_i sont identiques ; Ainsi (3.25) implique que, en régime permanent :

$$\overbrace{-I_3^T\mathcal{L}K_1X_\omega}^{=0} + K_2I_3^T(\omega - \omega_n I_3) = 0 \leftrightarrow \forall i, \omega_i = \omega_n$$

Ce qui montre que cette loi de commande permet d'assurer le rétablissement de la fréquence en régime permanent.

- Conception des paramètres du contrôle de fréquence secondaire basé sur le consensus (détermination des coefficients K_1 et K_2)

  La mise en place du contrôleur pour le contrôle secondaire de la fréquence est essentiellement basée sur la séparation de sa dynamique de celle du contrôle primaire.

  Donc, il vient (3.26) :

$$\begin{cases} \frac{d\omega_i}{dt} \approx 0 \rightarrow \omega_i = \omega_n - \Delta_\omega\left(\frac{P_i}{P_{in}} - 1\right) - X_{\omega i} \\ \frac{d}{dt}X_\omega = -\mathcal{L}K_1X_\omega + K_2\begin{bmatrix}\omega_1 - \omega_n \\ \omega_2 - \omega_n \\ \omega_3 - \omega_n\end{bmatrix} \end{cases} \tag{3.26}$$

  On pose : $\forall i,\ \Delta_\omega \times \left(\frac{P_i}{P_{in}} - 1\right) = \gamma$

  Ainsi, il vient (3.27)

$$\frac{d}{dt}X_\omega = -(\mathcal{L}K_1 + K_2)X_\omega - K_2\gamma I_3 \tag{3.27}$$

  Avec : $\lim_{t\to+\infty} I_3^T X_\omega = -3\,\gamma$

Les paramètres K_1 et K_2 sont calculés grâce à un processus de placement de pôles, γ étant considéré comme une perturbation extérieure. La bande passante associée est fixée 10 fois plus faible que la bande passante du contrôleur primaire avec son contrôleur distribué basé sur le consensus. Nous fixons $K_1 = 0.01$ et $K_2 = 0.1$ ce qui correspond à une bande passante égale à 0.1 rad/s.

Le contrôle secondaire distribué en fréquence s'avère efficace comme le montre le résultat de simulation présenté sur la figure 3.11. Ces résultats sont validés par les tests HIL comme le montre la figure 3.12. Le terme intégral non linéaire dans le contrôleur primaire est activé à 20s. Après l'application du contrôle secondaire à t=40s, les fréquences des DGs convergent vers leur valeur nominale.

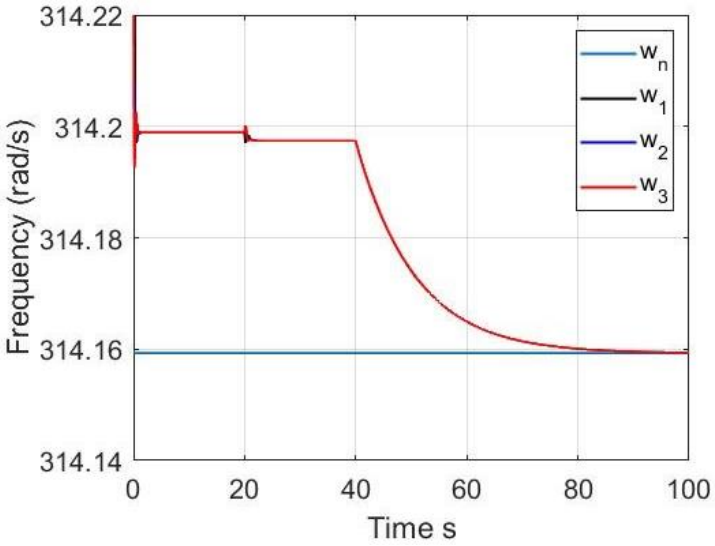


Fig.3.11 Evolution des fréquences des DG (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

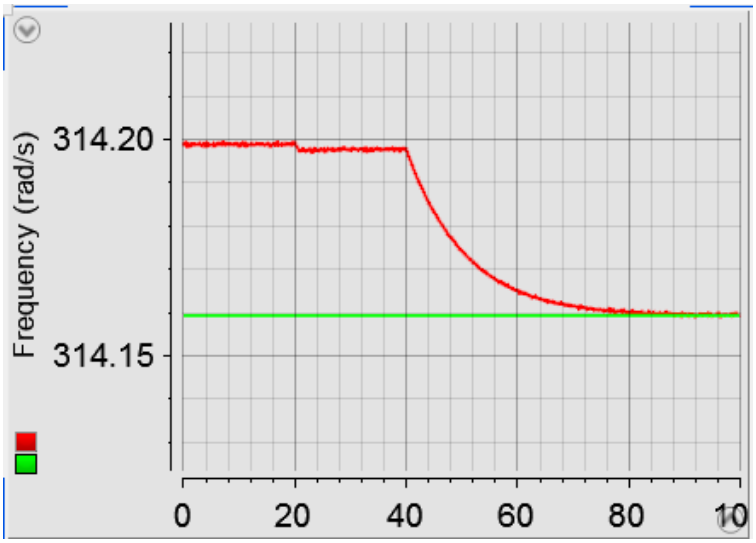


Fig.3.12 Evolution des fréquences des DG (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

- Effet du rétablissement de la fréquence sur le partage de la puissance active

Pour voir l'effet du contrôle secondaire de fréquence sur le partage de la puissance active, les résultats des simulations en figure 3.13 montrent l'évolution de la puissance active des DGs avec un contrôle primaire uniquement de t=0s à 40s et muni du contrôle secondaire en fréquence de t=40s à 100s. Ces résultats de simulation sont validés par les tests HIL de la figure 3.14. On peut remarquer sur les figures 3.13 et 3.14 que le partage de la puissance active des DG reste assuré et n'est pas affecté par le rétablissement de la fréquence à t>40s.

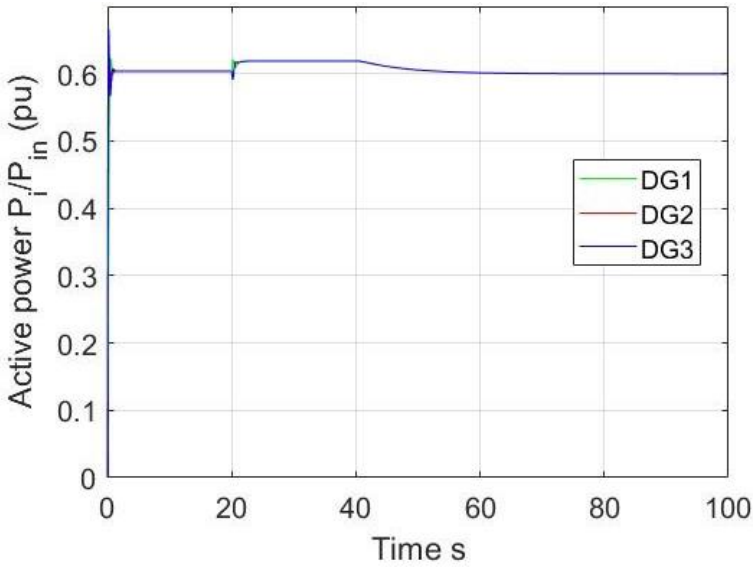


Fig.3.13 Évolution des puissances actives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape) (le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).

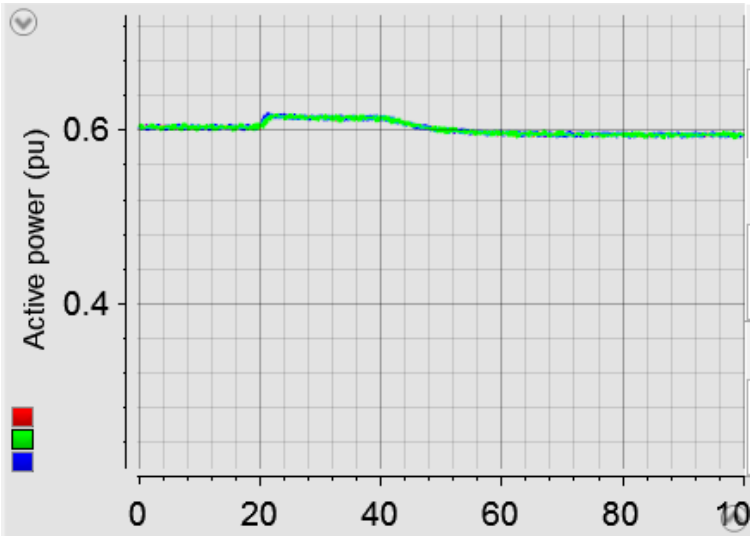


Fig.3.14 Évolution des puissances actives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL) (le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).

3.3.2. Régulation de tension distribuée et partage de la puissance réactive

Le contrôle distribué que nous proposons dans (3.28) et (3.29) vise à forcer la tension du DG maître (E_1) à converger vers sa valeur nominale tout en maintenant le partage de la puissance réactive des DG. Pour maintenir le partage de la puissance réactive, le terme supplémentaire X_{vi} apparaissant dans (3.30) doit être le même pour tous les DG en régime permanent. Cette propriété est obtenue grâce à la loi de commande distribuée (3.31-3.32). Dans (3.31) nous déterminons X_{vi} qui est ajouté au coefficient non linéaire J'_i de (3.24) noté maintenant J''_i pour le partage de la puissance réactive et utilisé dans (3.29)

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \omega_f(-\omega_i + \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) - X_{\omega i}) \tag{3.28}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \omega_f(-E_i + E_n - \frac{\Delta_E}{Q_{in}}(Q_i - Q_{in}) - J''_i(P_i - P_{in}))) \tag{3.29}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} J''_i = K_I \int \varepsilon_i dt \\ \varepsilon_i = \left[-\alpha\left(\frac{X_i}{E_n} - 1\right) - \left(\frac{Q_i}{Q_{in}} - 1\right)\right] - X_{vi} \end{cases} \tag{3.30}$$

$$\frac{dX_v}{dt} = -K_{Pv}(E_n - X) + K_{Iv}Y_v \tag{3.31}$$

$$\frac{dY_v}{dt} = -\mathcal{L}wX_v - fY_v \tag{3.32}$$

Avec : $w \in R, (K_{Pv}, K_{Iv}, f) \in R^3, Y_v = [Y_{v1}Y_{v2}Y_{v3}]^T \; et \; X_v = [X_{v1}X_{v2}X_{v3}]^T$

- Point de régime permanent

  (3.32) implique qu'en régime permanent que $I_3^T Y_v = 0$ (3.33)

  Alors (3.31) et (3.33), évalués en régime permanent plus le fait que toutes les composantes de X sont égales à E_1 en régime permanent, impliquent :

  $$I_3^T[E_n - X] = 0 = 3(E_n - E_1) \rightarrow E_1 = E_n \tag{3.34}$$

  Avec l'approche proposée, le contrôle secondaire basé sur le consensus permet de rétablir la magnitude de la tension au nœud correspondant au maître choisi à sa valeur nominale régime permanent.
  De plus, puisque $[E_n - X] = 0$ en régime permanent, Y_v converge 0 en régime permanent. Donc en régime permanent, $\mathcal{L}wX_v = 0$ implique que $X_v = \sigma I_3 \; avec \; \sigma \in R$. Ainsi, à partir de (3.30), on peut conclure que, si un régime permanent existe, alors le partage de la puissance réactive est conservé avec l'algorithme de rétablissement de la tension.

- Conception des paramètres de contrôle K_{Pv} et K_{Iv}

  Comme pour le rétablissement de la fréquence, la conception des paramètres du contrôleur pour le rétablissement de la tension est effectuée en séparant la dynamique du rétablissement de la tension et le contrôle primaire de la puissance réactive. On en déduit alors à (3.35) :

$$\forall i, \varepsilon_i = 0 \rightarrow E_n \left(X_{vi} + \left(\frac{Q_i}{Q_{in}} - 1 \right) \right) = \alpha (E_n - X_i) \tag{3.35}$$

Sur la base des équations (3.31) et (3.35), on obtient (3.36) :

$$\frac{dX_v}{dt} = -\frac{K_{Pv} \times E_n}{\alpha} \left(X_v + \begin{pmatrix} \frac{Q_1}{Q_{1n}} - 1 \\ \frac{Q_2}{Q_{2n}} - 1 \\ \frac{Q_3}{Q_{3n}} - 1 \end{pmatrix} \right) + K_{Iv} Y_v \tag{3.36}$$

- (3.32) et (3.36) peuvent être mis sous la forme de (3.37) :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} -\frac{K_{Pv} E_n}{\alpha} I_{33} & K_{Iv} I_{33} \\ -\mathcal{L}w & -f \end{bmatrix}}^{A_{eq}} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{Pv} E_n}{\alpha} \begin{pmatrix} \frac{Q_1}{Q_{1n}} - 1 \\ \frac{Q_2}{Q_{2n}} - 1 \\ \frac{Q_3}{Q_{3n}} - 1 \end{pmatrix} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

Les valeurs propres de A_{eq} dans (3.37) sont fixées pour avoir une partie réel négative grâce au choix des paramètres de contrôle K_{Pv},K_{Iv} et f. La pulsation de coupure a été fixée à 0,1 rad/s.

Le contrôle secondaire distribué de la tension s'avère efficace comme le montre les résultats de simulation présentés sur la figure 3.16. Ces résultats sont validés par des tests HIL comme le montre la figure 3.17. On peut voir sur la figure 3.15 et comme prévu les valeurs de Xvi convergent vers la même valeur pour garder le partage de la puissance réactive des DG. On peut voir aussi sur les figures 3.16 et 3.17 qu'après la déviation des tensions des DG causée par le contrôle primaire et après l'application du contrôle secondaire à t=40s, la tension du DG maître E_1 converge vers sa valeur nominale. Les tensions des autres DG convergent vers des valeurs proches de la tension nominale, ce qui valide l'efficacité du contrôle proposé pour le rétablissement de la tension.

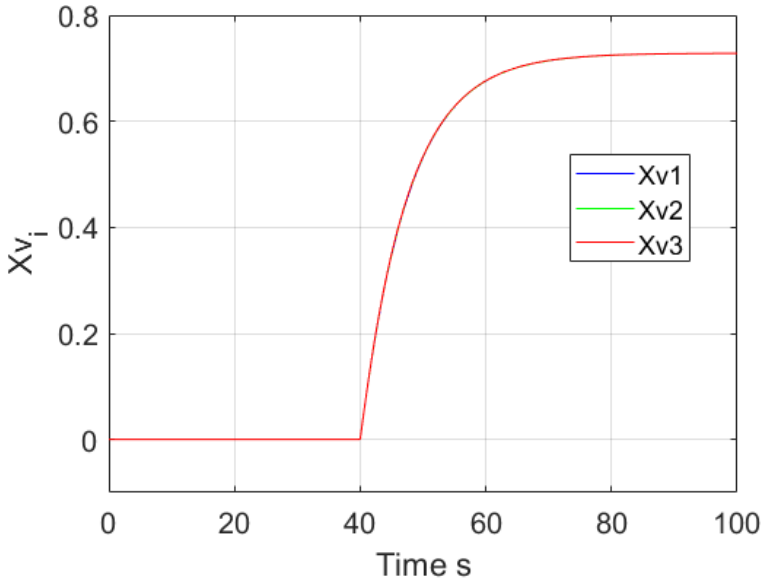


Fig.3.15 Evolution des Xvi (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

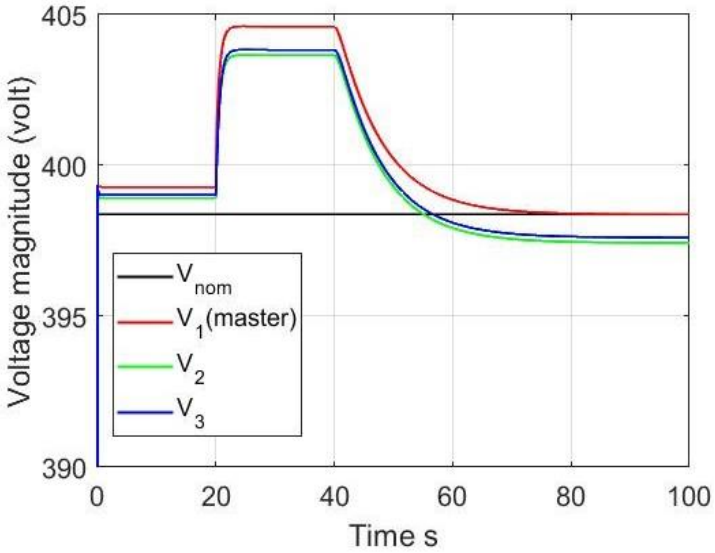


Fig.3.16 Evolution des tensions des DG (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

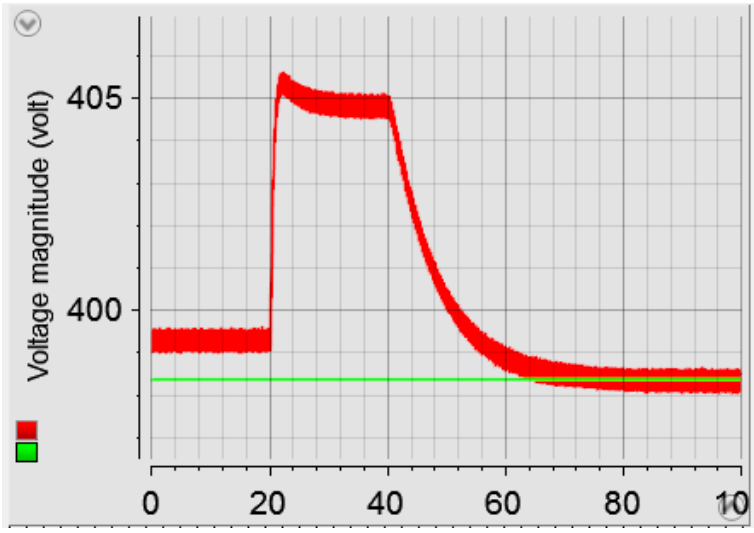


Fig.3.17 Evolution de la tension du DG1 (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

- Effet du rétablissement de la tension sur le partage de la puissance réactive

  Pour voir l'effet du rétablissement de la tension sur le partage de la puissance réactive des DG, les résultats des simulations présentés sur la figure 3.18 montrent l'évolution de la puissance réactive des DG sous le contrôle primaire de t=0s à 100s et sous le contrôle secondaire de t=40s à 100s. Ces résultats de simulation sont validés par les tests HIL de la figure 3.19. On peut remarquer sur les figures 3.18 et 3.19 que le partage de la puissance

réactive des DG en régime permanent reste assuré et n'est pas affecté par le rétablissement de la tension à t>40s.

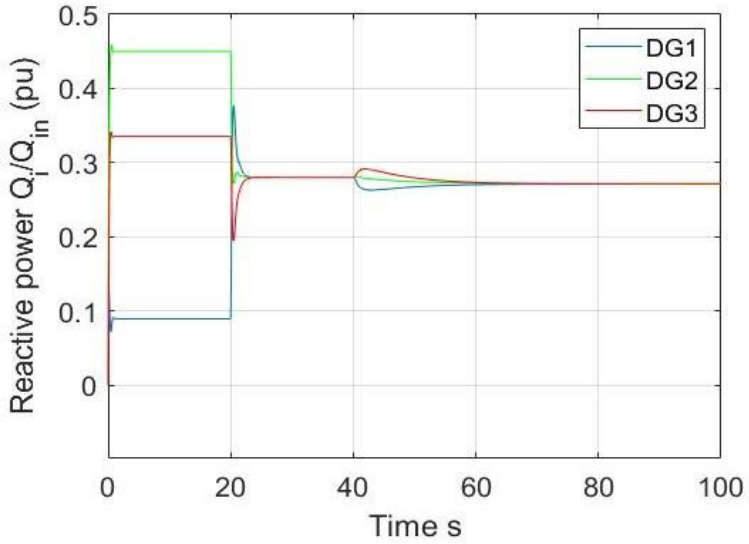


Fig.3.18 Évolution des puissances réactives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

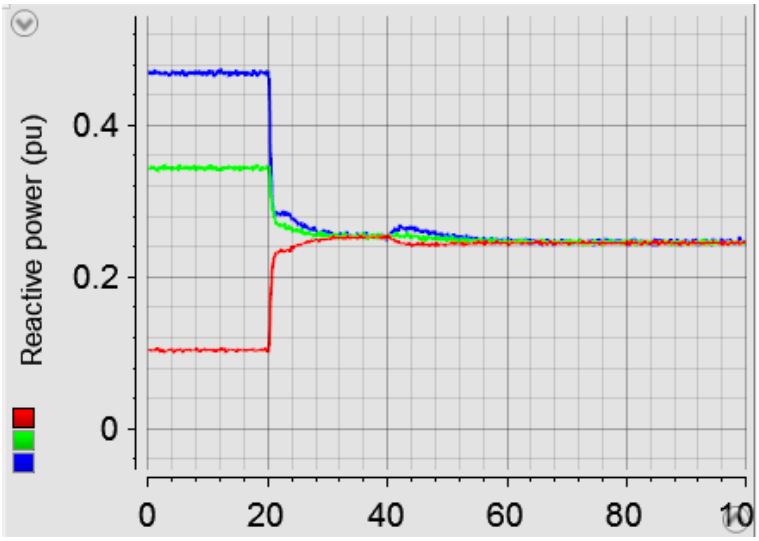


Fig.3.19 Évolution des puissances réactives des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL). (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

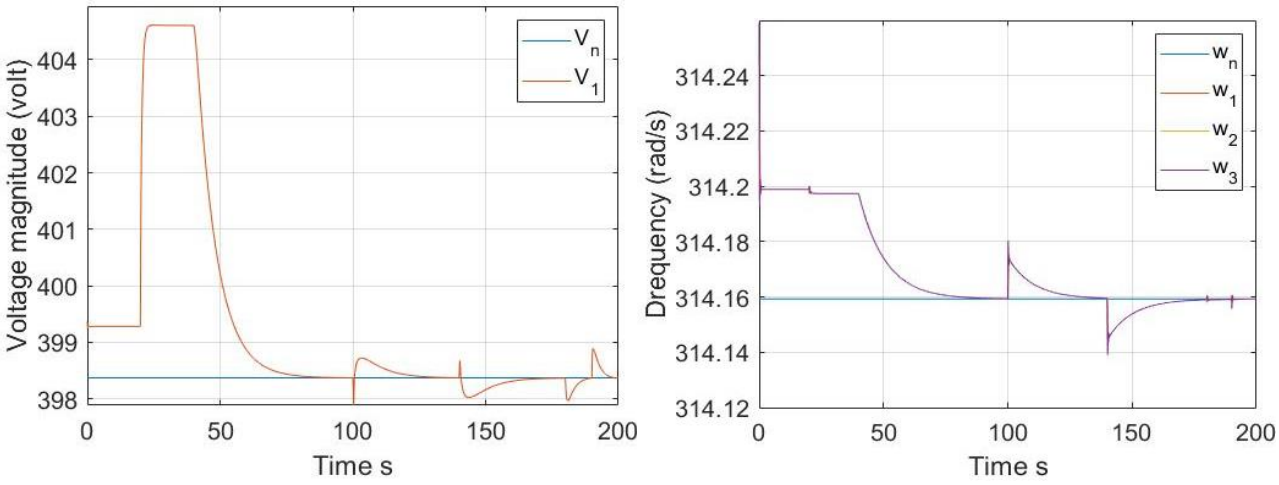
3.3.3. Robustesse du contrôle secondaire de la fréquence et de la tension

Afin de tester et de valider la robustesse du contrôle secondaire de fréquence et de tension proposé par rapport aux variations de la charge, après l'application du terme non linéaire du contrôle primaire à t=20s, le contrôle secondaire de fréquence et de tension est activé à t=40s. La charge 2 est déconnectée à t = 100s puis reconnectée à t=140s. De plus, pour voir si le contrôle est robuste face

aux changements de topologie du micro-réseau, une ligne électrique (ligne 2) est soudainement déconnectée à t=180s et reconnectée à t=190s.

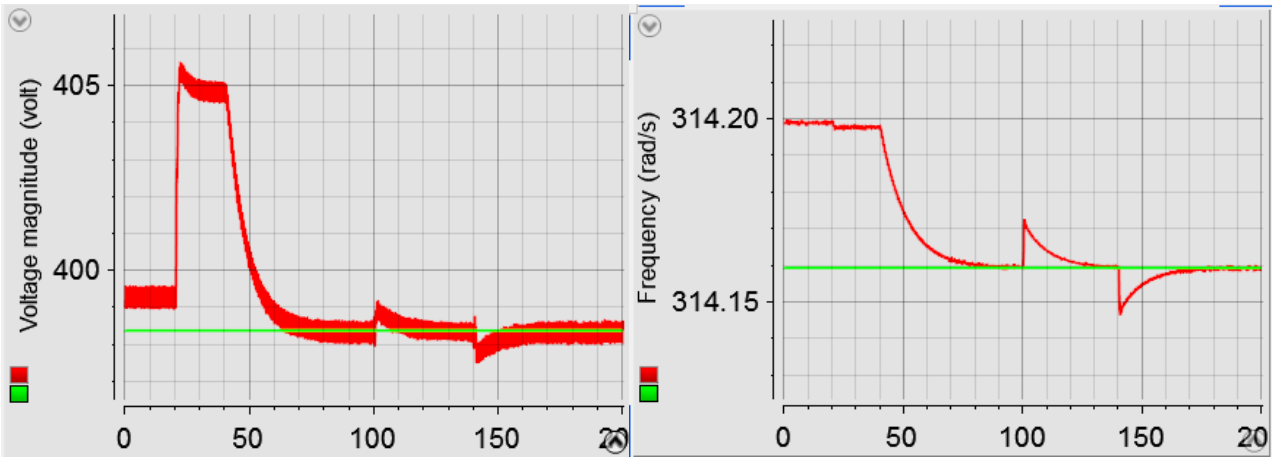
Les résultats de simulation des figures 3.20a, b, confirmés par les tests HIL des figures 3.21a, b montrent que la fréquence et la tension convergent vers leurs valeurs nominales même après la déconnexion et la reconnexion d'une charge et d'une ligne électrique. Ces résultats valident la robustesse du contrôle secondaire pour le rétablissement de la fréquence et de la tension par rapport aux changements de topologie et aux variations de charge.

Aussi, comme le montrent les figures 3.22a, b et 3.23a, b le partage de la puissance active et réactive est toujours maintenu avec les commandes primaires et secondaires distribuées proposées, même en cas de variation de la charge et de changement de topologie du micro-réseau.



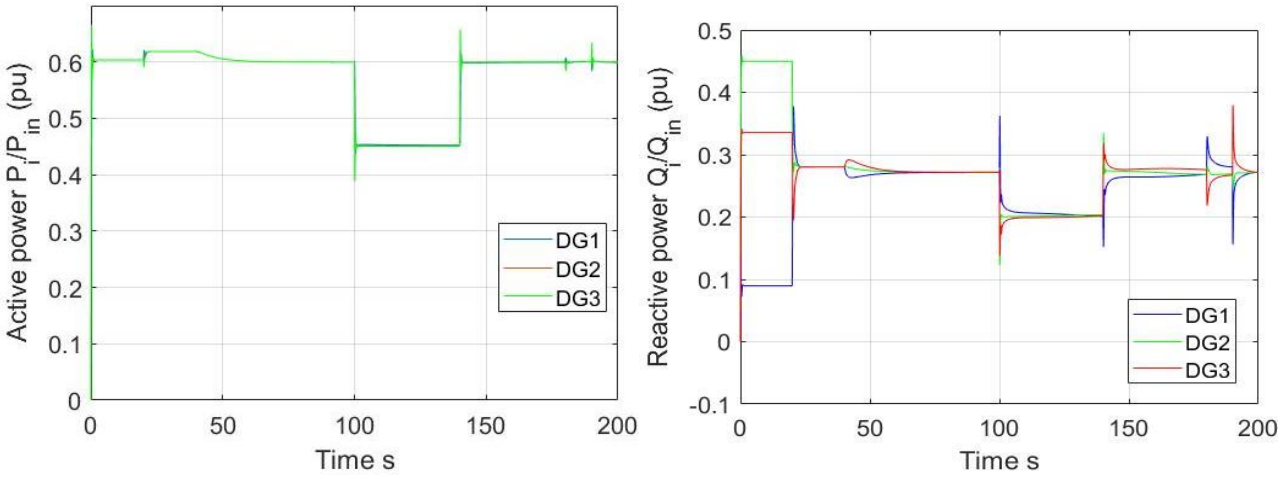
(a) (b)

Fig.3.20 Evolution des tensions (a) et des fréquences (b) des DG (Simscape) sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)



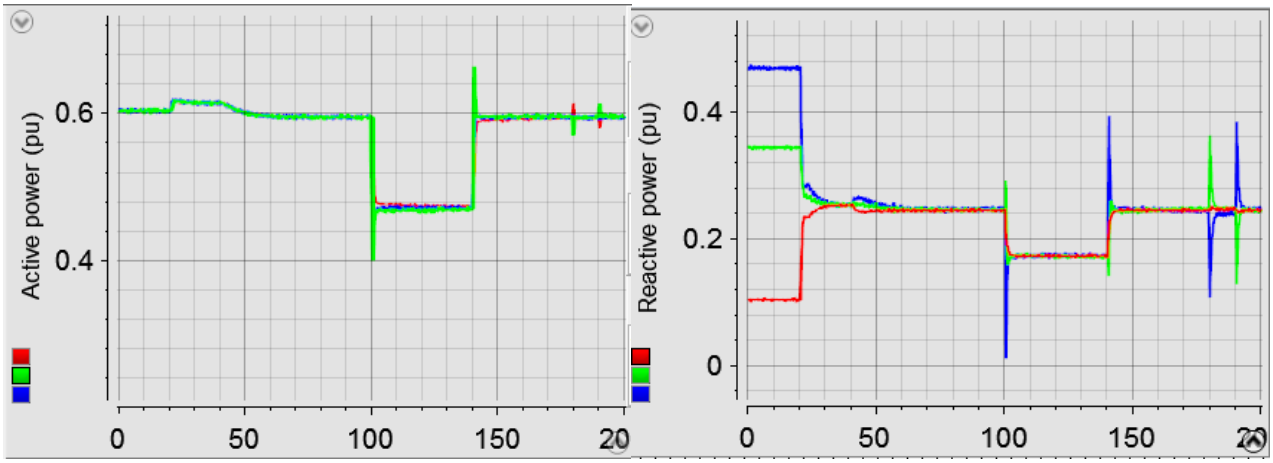
(a) (b)

Fig.3.21 Evolution des tensions (a) et des fréquences (b) des DG (HIL) sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)



(a) (b)

Fig.3.22 Évolution de la puissance active (a) et de la puissance réactive (b) des DG sous les contrôles primaire et secondaire (Simscape) et sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)



(a) (b)

Fig.3.23 Évolution de la puissance active (a) et de la puissance réactive (b) des DG sous les contrôles primaire et secondaire (HIL) et sous différentes conditions de charge et de topologie. (Le contrôle non-linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s)

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

3.4. Impact des délais de communication sur la stabilité du micro-réseau

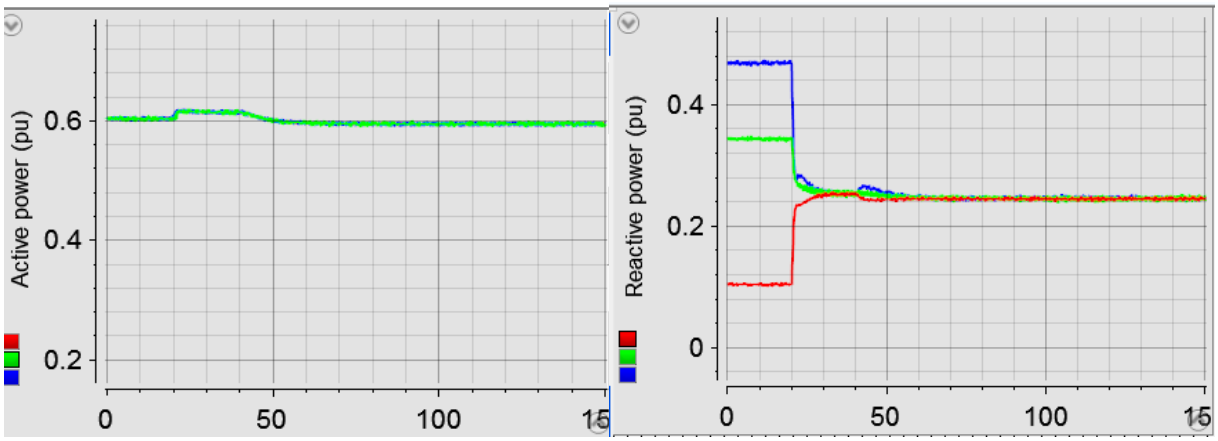
Le contrôle proposé pour le partage des puissances active et réactive ainsi que pour la restauration de fréquence et de tension est distribué et utilise des algorithmes de consensus qui se basent sur l'échange d'informations via une communication entre les DG. Cette communication peut affecter la stabilité du micro-réseau si d'importants retards de communication se produisent. Afin d'examiner et d'évaluer l'impact du délai de communication sur les contrôles proposés, des tests HIL du micro-réseau maillé présenté sur la figure 3.1 sont réalisés. Les 3 DG sont connectés au micro-réseau iloté à t = 0 s. Tout d'abord, la commande conventionnelle Droop (sans le terme non linéaire $\mathrm{J'}_i(\mathrm{P}_i - \mathrm{P}_{in})$ dans (3.6) qui ne nécessite aucune communication est appliquée jusqu'à t = 20 s. A t = 20s, la commande non linéaire proposée pour les réglages primaires de tension et fréquence est appliquée en utilisant les équations (3.28) et (3.29). Pour vérifier l'effet du délai de communication sur le partage de la puissance et la stabilité du micro-réseau, différents délais de communication sur les informations transférées entre les DG ($\mathrm{X}_i, X_{vi}, Y_{vi}$ and $X_{\omega i}$) sont considérés. A t=40s, le contrôle secondaire pour le rétablissement de la fréquence et de la tension est appliqué en considérant toujours les mêmes délais de communication. Dans les simulations numériques, un retard pur de type 'delay' sera introduit sur tous les signaux échangés. Pour la modélisation mathématique (paragraphe 3.5), le délai de communication est modélisé par un filtre du premier ordre avec Td sa constante de temps comme le montre l'équation (3.38).

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{X^*}_i}{\mathrm{X}_i} = \dfrac{1}{1+T_d s} \\ \dfrac{\mathrm{X^*}_{vi}}{\mathrm{X}_{vi}} = \dfrac{1}{1+T_d s} \\ \dfrac{\mathrm{Y^*}_{vi}}{\mathrm{Y}_{vi}} = \dfrac{1}{1+T_d s} \\ \dfrac{\mathrm{X^*}_{\omega i}}{\mathrm{X}_{\omega i}} = \dfrac{1}{1+T_d s} \end{cases} \tag{3.38}$$

Pour le premier test, le délai de communication est fixé à 40 ms ; les figures 3.24a, b montrent l'évolution des puissances actives et réactives des DG et les figures 25a, b montrent l'évolution de la fréquence et de la tension du premier DG (maître). On peut voir que le partage de la puissance active et réactive n'est pas affecté et que la stabilité du micro-réseau reste assurée même après l'application du contrôle secondaire à 40s. Comme on peut le constater, la fréquence et la tension convergent vers leurs valeurs nominales sans problème.

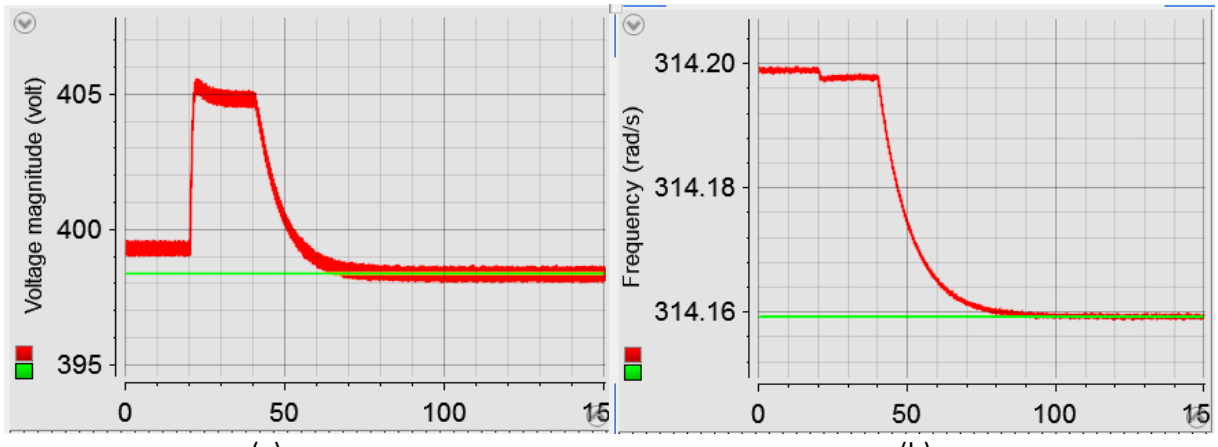
Lorsque le délai de communication passe à 80 ms (Figures 3.26 et 3.27), les performances du contrôleur semblent être légèrement affectées après l'application du contrôle secondaire. Une oscillation peut être observée sur les puissances actives et réactives des DG. Cependant, ces oscillations de puissance sont amorties et le partage précis de la puissance des DG est atteint, comme le montrent les figures 3.26a, b. La fréquence et la tension du DG1 convergent également vers leurs valeurs nominales, comme le montrent les figures 27a, b. Enfin, lorsque le délai de communication est fixé à 110 ms, le partage de la puissance est totalement perdu après l'application du contrôle secondaire à t=40s et le micro-réseau devient instable, comme le montrent les figures

28a, b et 29a, b. Le délai de communication maximum qui peut être toléré par le contrôle primaire en l'absence de réglage secondaire est de 150ms. En présence d'un contrôle secondaire il passe à 102ms. Ce résultat signifie que la stratégie de contrôle proposée peut être appliquée de manière pratique au contrôle des micro-réseaux maillés à condition d'adapter la bande passante des réglages primaires et secondaires au retard de communication s'il est supposé connu à priori. En modifiant la dynamique des contrôles primaires et secondaires, cette valeur maximale du délai de communication peut être améliorée.



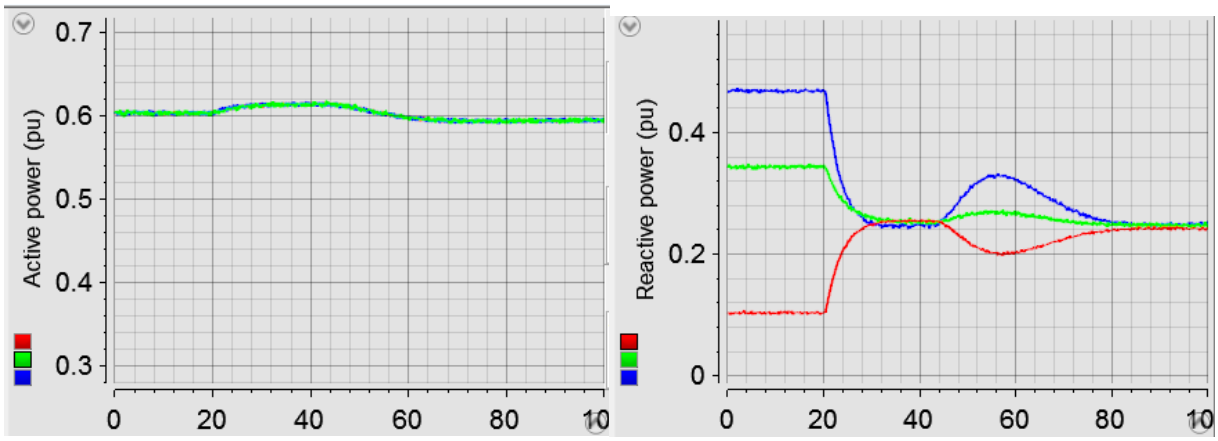
(a) (b)

Fig.3.24 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 40 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).



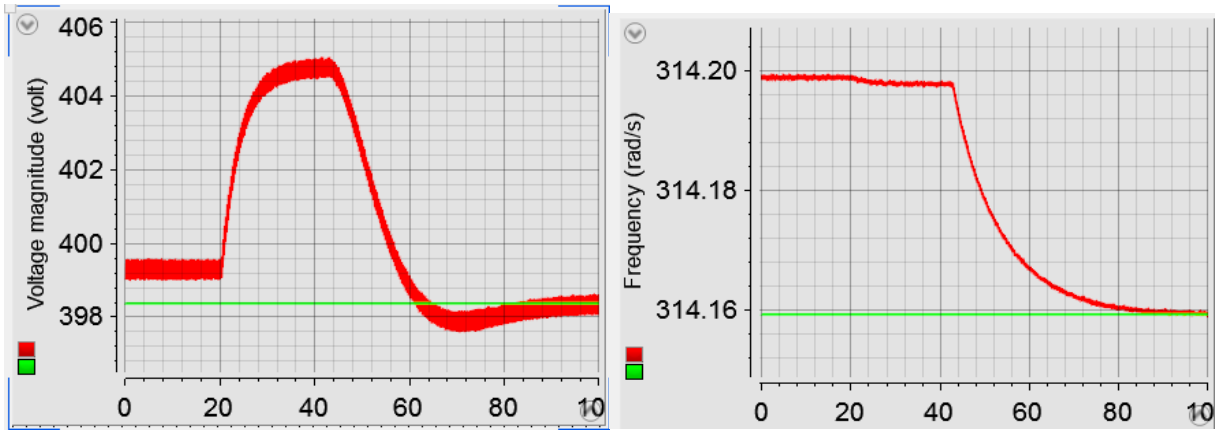
(a) (b)

Fig.3.25 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 40 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).



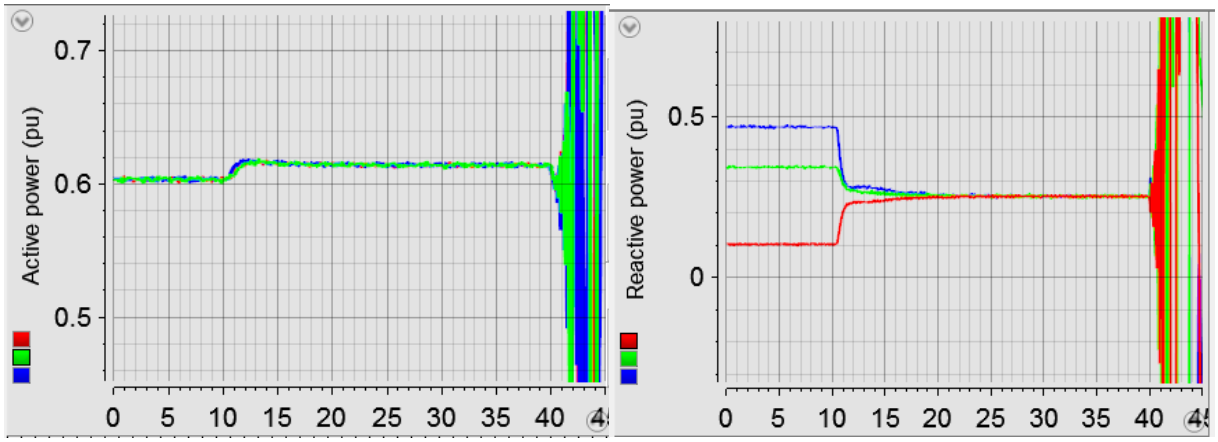
(a) (b)

Fig.3.26 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 80 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).



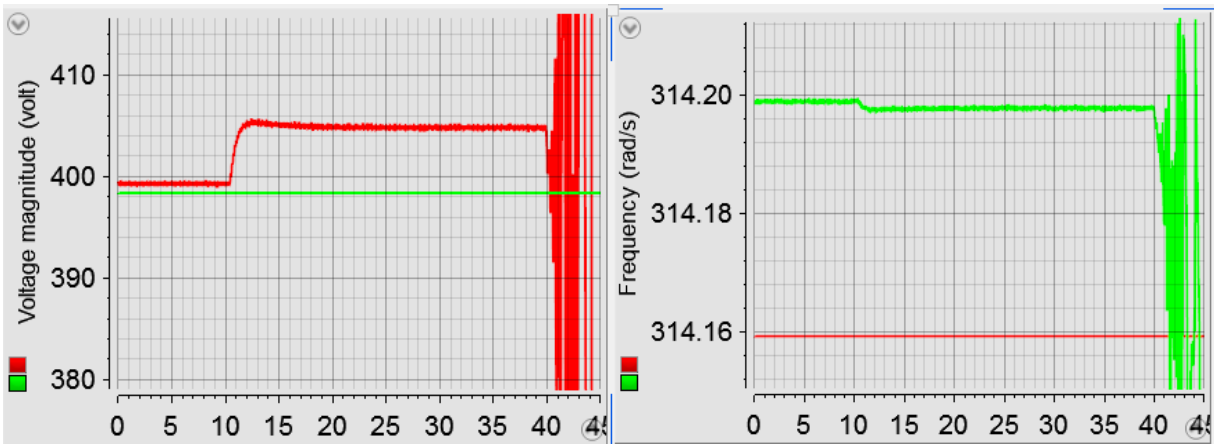
(a) (b)

Fig.3.27 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 80 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).



(a) (b)

Fig.3.28 Évolution des puissances active (a) et réactive (b) des DG avec un délai de communication de 110 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).



(a) (b)

Fig.3.29 Evolution de la tension (a) et de la fréquence (b) du DG1 avec un délai de communication de 110 ms. (Le contrôle non linéaire est appliqué à 20 s et le contrôle secondaire commence à 40 s).

3.5. Modélisation du système pour son analyse de stabilité

Sur la base de la méthode de modélisation du chapitre 2, le modèle global du micro-réseau illustré à la figure 3.29, muni d'un contrôle primaire par consensus, défini par les équations (3.4), (3.5) et (3.6), possède 53 variables d'état qui constituent les éléments du vecteur d'état x, décrit dans la suite (3.39).

$$[x]^T = [i_{13_d}\ i_{13_q}\ i_{23_d}\ i_{23_q}\ i_{25_d}\ i_{25_q}\ i_{14_d}\ i_{14_q}\ i_{56_d}\ i_{56_q}\ i_{46_d}\ i_{46_q}\ E_{1_d}\ E_{1_q}\ E_{2_d}\ E_{2_q}\ E_{6_d}\ E_{6_q}\ E_{3_d}\ E_{3_q}\ E_{4_d}\ E_{4_q}\ E_{5_d}\ E_{5_q}\ i_{CH1_d}\ i_{CH1_q}\ i_{CH2_d}\ i_{CH_q}\ i_{CH3_d}\ i_{CH3_q}\ P_{f1}\ Q_{f1}\ P_{f2}\ Q_{f2}\ P_{f3}\ Q_{f3}\ \delta\ \delta_1\ \dot{E}_{1_d}\ \dot{E}_{1_q}\ \dot{E}_{2_d}\ \dot{E}_{2_q}\ \dot{E}_{1_d}\ \dot{E}_{1_q}\ J_1\ J_2\ J_3\ X_1\ X_2\ X_3\ Y_1\ Y_2\ Y_3] \quad (3.39)$$

Le modèle global du micro-réseau est non linéaire et peut finalement se présenter sous la forme suivante :

$$\dot{x} = f(x) \text{ avec } f: R^n \to R^n, n = 53 \quad (3.40)$$

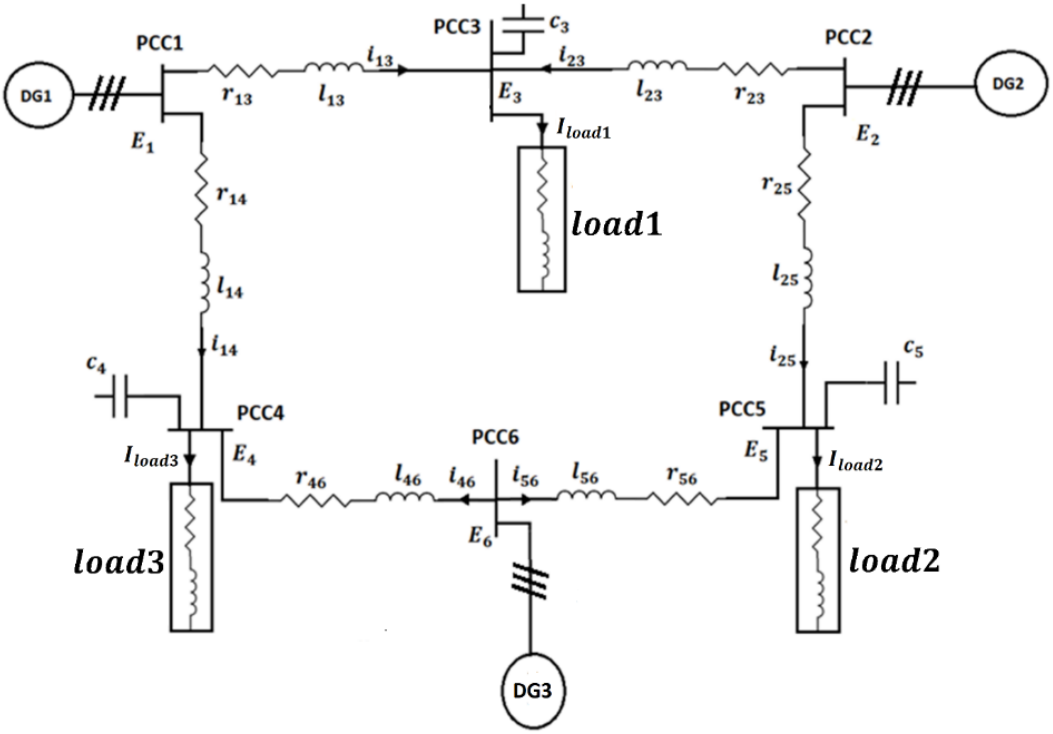


Fig.3.30 Micro-réseau maillé ilote pour la modélisation

3.5.1. Validation du modèle d'état

Les résultats concernant l'évolution des puissances active et réactive du micro-réseau, obtenus dans les mêmes conditions à l'aide du modèle Simscape et du modèle mathématique, ont été utilisés pour valider le modèle d'état établi. Le même scénario de simulation a été considéré pour obtenir les résultats de simulation à l'aide des deux modèles. Les trois DG ont été connectés au micro-réseau à t=0 s en appliquant le Droop classique puis le contrôleur proposé pour l'équirépartition des puissances est appliqué à t = 5s. Les résultats de simulation des deux modèles considérés sont présentés dans la Figure 3.30a, b, illustrant l'évolution des puissances active et réactive de DG1, DG2 et DG3. Les deux modèles ont conduit à des résultats quasi-identiques ; par conséquent, le modèle d'état établi est considéré comme validé. Il peut donc être utilisé pour étudier la stabilité du micro-réseau et la robustesse de son contrôle. Pour confirmer la validité du modèle développé, la Figure 3.30c montre une vue agrandie de l'état transitoire après l'application du control non-linéaire à 5 s.

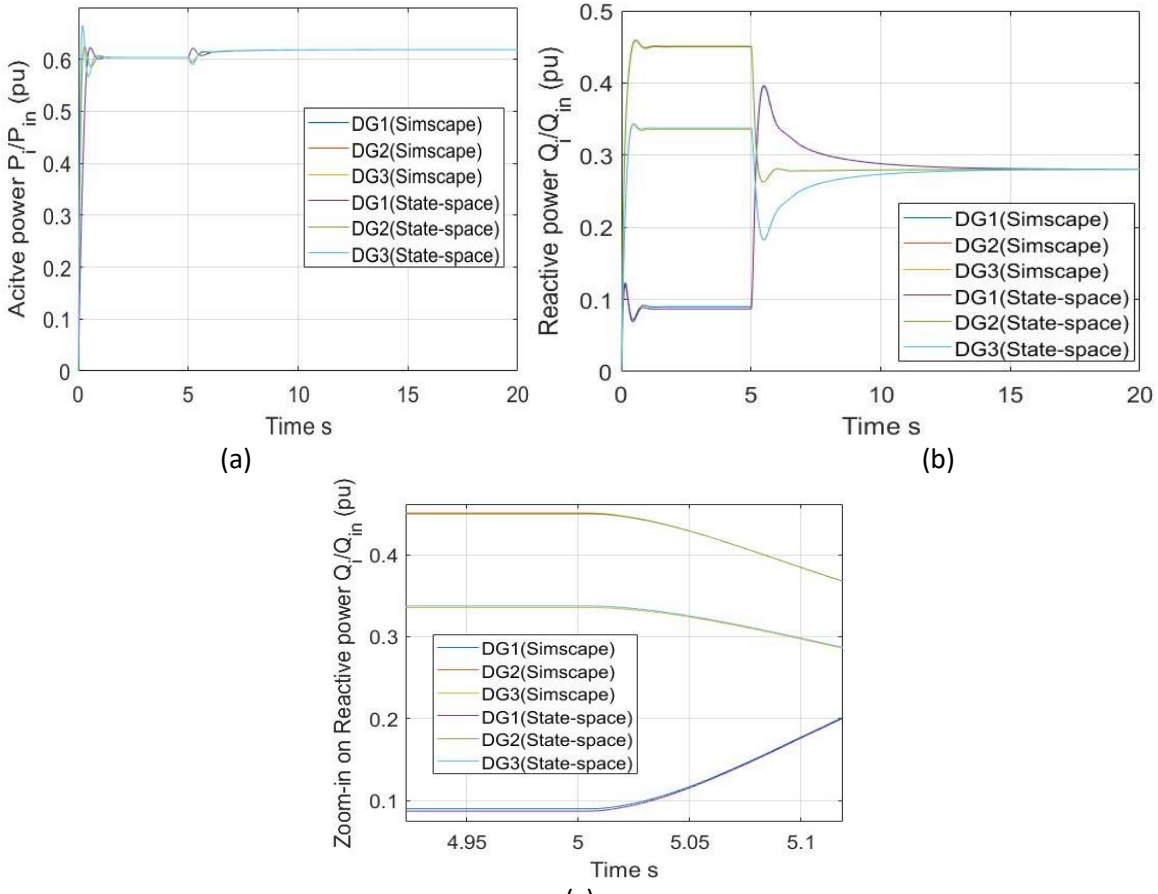


Fig.3.31 Résultats de la simulation obtenus à l'aide de Simscape et du modèle d'état mathématique. Les 3 DG sont connectés au micro-réseau à t= 0s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s. (a) Evolution des puissances actives des DG. (b) Evolution des puissances réactives des DG par unité. (c) Zoom sur les puissances réactives par unité autour de 5s.

3.5.2. Stabilité du micro-réseau maillé et analyse de robustesse de son contrôle primaire avec consensus

3.5.2.1. Valeurs propres de la matrice jacobienne

Comme dans le chapitre 2, afin d'étudier la stabilité du micro-réseau, défini par le système différentiel non linéaire continu (3.40), et d'analyser son comportement dynamique qui est affecté par plusieurs paramètres de contrôle, une analyse de sensibilité aux valeurs propres est effectuée au moyen du calcul des valeurs propres de la matrice jacobienne $\left(\frac{\partial \mathrm{f}}{\partial \mathrm{x}}\right)_{\mathrm{x}_0}$ au point de fonctionnement défini par $f(\mathrm{x}_0) = 0$. Le système, c'est-à-dire le micro-réseau, sera asymptotiquement stable autour du point de fonctionnement x_0 si les parties réelles de toutes les valeurs propres sont strictement négatives.

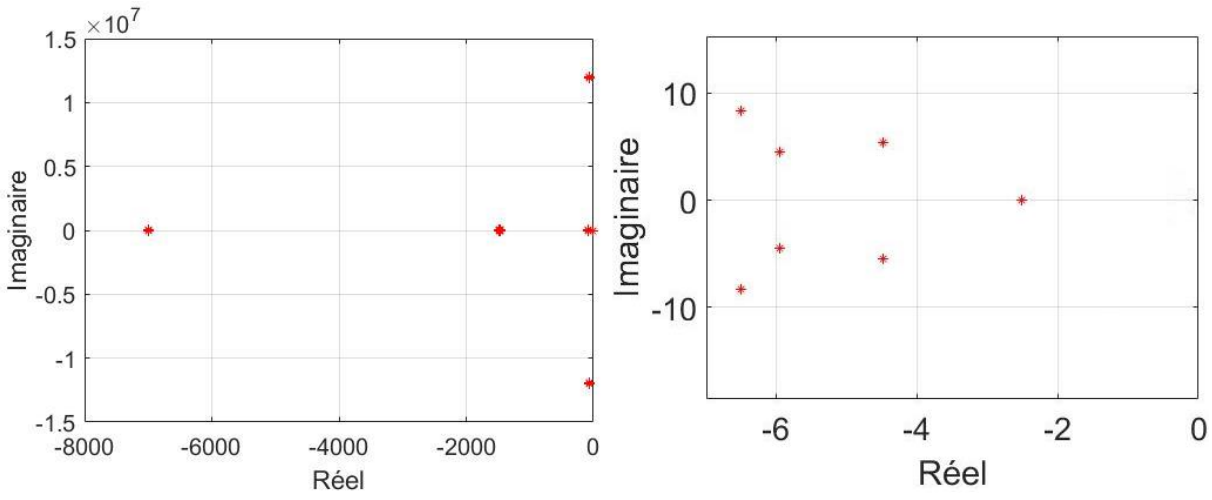
Les paramètres du système sont les mêmes que dans le chapitre 2 (tableaux 2.3, 2.4 et 2.5). Pour la troisième DG, ajoutée dans ce chapitre, ses paramètres sont indiqués dans le tableau 3.3 :

Table 3.3 Paramètres de DG3

DGs	Puissance active nominale (kW)	Puissance réactive nominale (kVAr)	Tension nominale entre phases (V)	Fréquence de coupure pour Filtre pour le calcul de la puissance (rad/s)	Fréquence de coupure pour le filtre de second ordre (rad/s)	Facteur d'amortissement	Variations admissibles de la pulsation (pour la commande Droop)	Variations admissibles de la tension (pour le contrôle Droop)
DG3	$P_{3n} = 4$	$Q_{3n} = 1$	400	$\omega_{f3} = 20$	$\omega_{c3} = 1000$	$\xi = 0.7$	$\Delta_\omega = 0.5$	$\Delta_E = 6$

Les valeurs propres du système au point de fonctionnement considéré, correspondant aux paramètres des charges et des DG donnés dans les tableaux 2.3, 2.4, 2.5 et 3.3, sont illustré dans la figure 3.32-a. On peut observer que 3 des valeurs propres de la matrice jacobienne sont des nombres réels négatifs, et que les 49 autres valeurs propres sont deux par deux des nombres complexes conjugués, ayant des parties réelles négatives. La Figure 3.32-b montre une vue agrandie sur les valeurs propres basse fréquence.

Toutes les valeurs propres de la matrice jacobienne ont des parties réelles négatives, par conséquent le micro-réseau, muni du contrôle proposé, peut être considéré comme un système stable autour du point de fonctionnement considéré. Cela valide le prédimensionnement des K_i, α, K_x et K_y proposées pour le réglage primaire. L'étude de la stabilité du micro-réseau maillé considéré autour d'autres points de fonctionnement peut également être menée sur la base du modèle d'état établi.



(a) (b)

Fig.3.32 (a) Valeurs propres dans les conditions de fonctionnement nominales. (b) Zoom sur les valeurs propres basse fréquence.

Afin d'effectuer l'analyse de sensibilité les paramètres des différents constituants du micro-réseau, y compris ses paramètres de contrôle, ont été modifiés séparément. Dans les sections suivantes, l'évolution des trajectoires des valeurs propres avec la variation des paramètres de chaque constituant du micro-réseau est discutée pour vérifier leur impact sur la stabilité du système.

3.5.2.2. Influence des paramètres des lignes électriques sur la stabilité du micro-réseau

Pour faire varier les paramètres des 6 lignes électriques du micro-réseau, les valeurs des longueurs de toutes les lignes électriques sont modifiées simultanément par 10 pas de 10% (pour chaque ligne, de sa longueur initiale à deux fois cette longueur), les valeurs propres de la matrice Jacobéenne sont déterminées, et leur évolution est montrée sur la Figure 3.32. La variation des paramètres des lignes électriques n'impacte que les valeurs propres complexes λ_1 à λ_{12}, les autres valeurs propres λ_{13} à λ_{53} ne varient pas significativement avec l'évolution des paramètres des lignes électriques. Les parties réelles des valeurs propres impactées (λ_1 à λ_{12}) se déplacent vers la droite mais restent suffisamment négatives pour ne pas impacter la stabilité du système lorsque les paramètres de la ligne sont augmentés dans l'intervalle considéré.

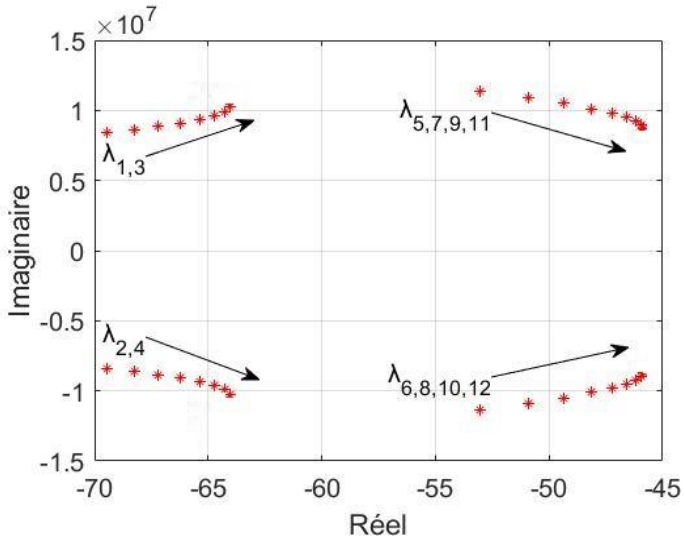


Fig.3.33 Évolution des valeurs propres sensibles aux changements des paramètres des lignes

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que le changement dans les paramètres de ligne n'affecte pas la stabilité du système. Les résultats réalisés à l'aide du modèle Simscape avec deux fois les valeurs nominales des paramètres des lignes, sont illustrés sur la Figure 3.34 sous forme d'évolution des puissances réactives des DG.

Ces résultats confirment que la stabilité du système n'est pas affectée par le changement dans les paramètres des lignes et que seule la dynamique du système est devenue moins rapide qu'avec les paramètres nominaux, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi. Ils confirment également les résultats des tests de robustesse du control primaire face aux changements de topologie du micro-réseau (sections 3.2.3 et 3.2.4).

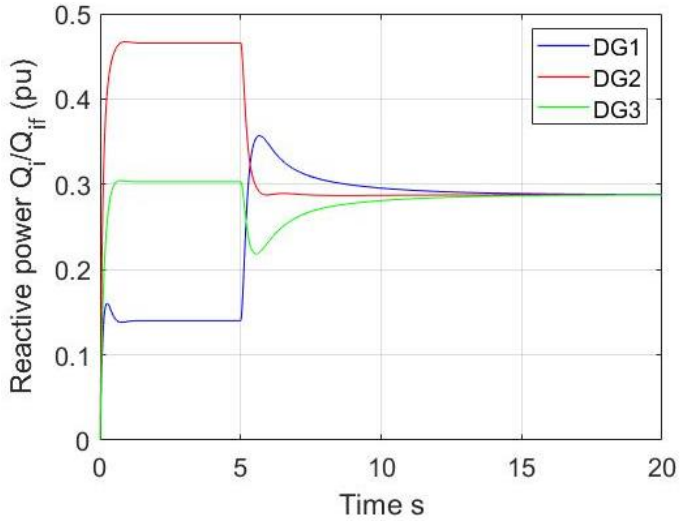


Fig.3.34 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec deux fois les valeurs initiales des paramètres des lignes.

3.5.2.3. Influence des paramètres de contrôle sur la stabilité du micro-réseau

La même approche est utilisée pour étudier l'impact d'autres paramètres qui peuvent contribuer à l'instabilité du système. Pour les DGs considérés, les paramètres qui peuvent avoir un impact sur la stabilité du système sont la fréquence de coupure ω_f pour générer la pulsation électrique ω_i et la tension E_{i} de chaque DG, la valeur de la fréquence de coupure ω_c du filtre du second ordre qui modélise la bande passante des régulateurs internes des DGs, ainsi que les paramètres du statisme Δ_ω et Δ_E.

Tout d'abord, la fréquence de coupure ω_f est modifiée par 10 pas (de sa valeur initiale à 10 fois cette valeur), tous les autres paramètres restants constants. Les valeurs propres de la matrice la matrice Jacobéenne sont déterminées, et leurs évolutions sont illustrées sur la Figure 3.35.

La variation de ω_f a un impact sur les valeurs propres λ13 à λ22, λ29 à λ34, λ37 à λ46 ainsi que sur les valeurs propres λ50 à λ53. Les autres valeurs propres ne varient pas significativement avec l'évolution de ω_f.

On constate que lorsque ω_f augmente, les valeurs propres λ37 à λ46 ainsi que sur les valeurs propres λ50 à λ53 sont décalées vers la gauche tandis que les autres se déplace légèrement vers la droite, mais leurs valeurs ne changent pas considérablement et restent largement négatives. Le système reste toujours stable lorsque ω_f augmente, juste la dynamique du système qui varie.

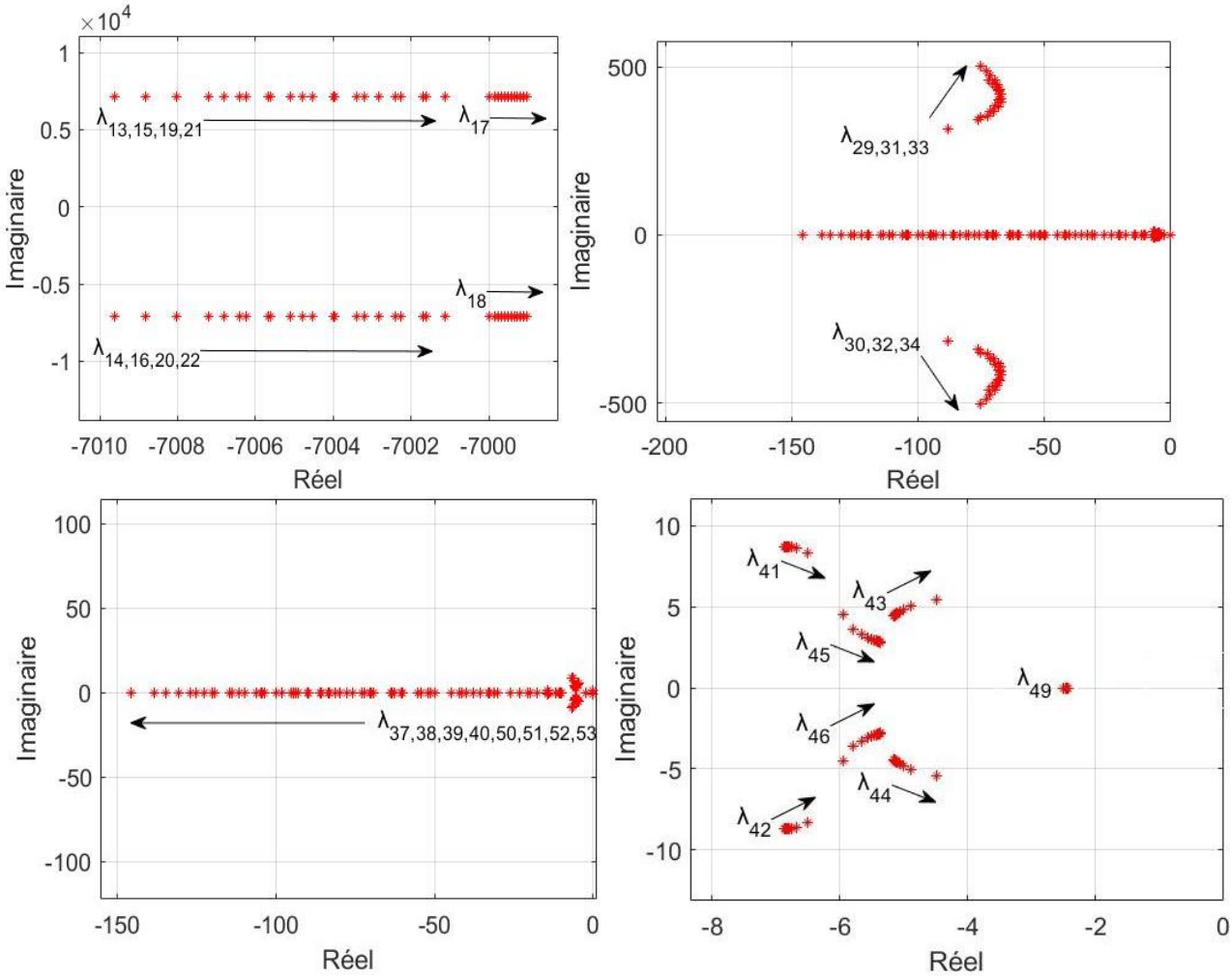


Fig.3.35 Évolution des valeurs propres sensible lors de la variation de ω_f (20<ω_f<200(rad⁄s) avec ω_f croissant).

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que ω_f n'affecte pas la stabilité du système. Les résultats de simulation réalisée à l'aide du modèle Simscape avec ωf = 200 rad/s, sont illustrés sur la Figure 3.36. Ces résultats confirment que la stabilité du système n'est pas assez affectée par ωf, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi.

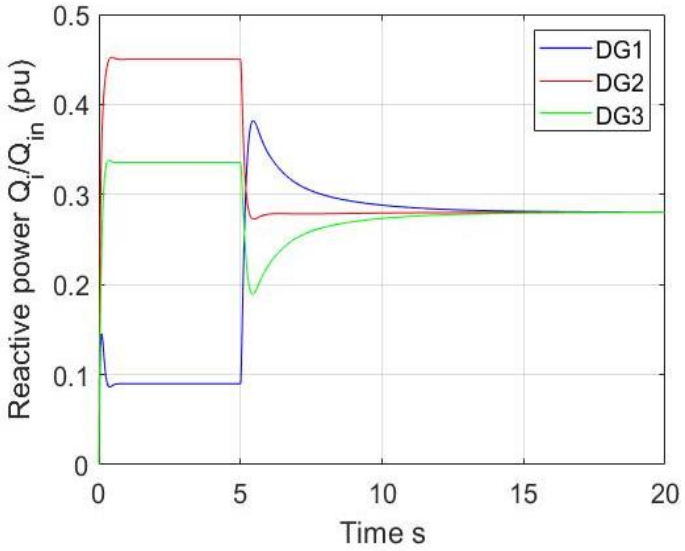


Fig.3.36 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωf = 200 rad/s.

Pour examiner l'impact de ω_c, représentant le retard imposé par les onduleurs contrôlant les DG, sur la stabilité du système, la valeur de ω_c est largement diminuée (de sa valeur initiale 1000 rad/s à 20 rad/s). Les valeurs propres les plus sensibles à la variation de ω_c sont λ41, λ42, λ45, λ46, λ51, λ52 ainsi que λ17 et λ18, qui sont deux par deux des nombres complexes conjugués. Comme le montre la Figure 3.37, les parties réelles des valeurs propres impactées se déplacent vers la droite lorsque ω_c diminue et tendent à être positives lorsque ω_c devient inférieur à 20 rad/s, ce qui provoque l'instabilité du système.

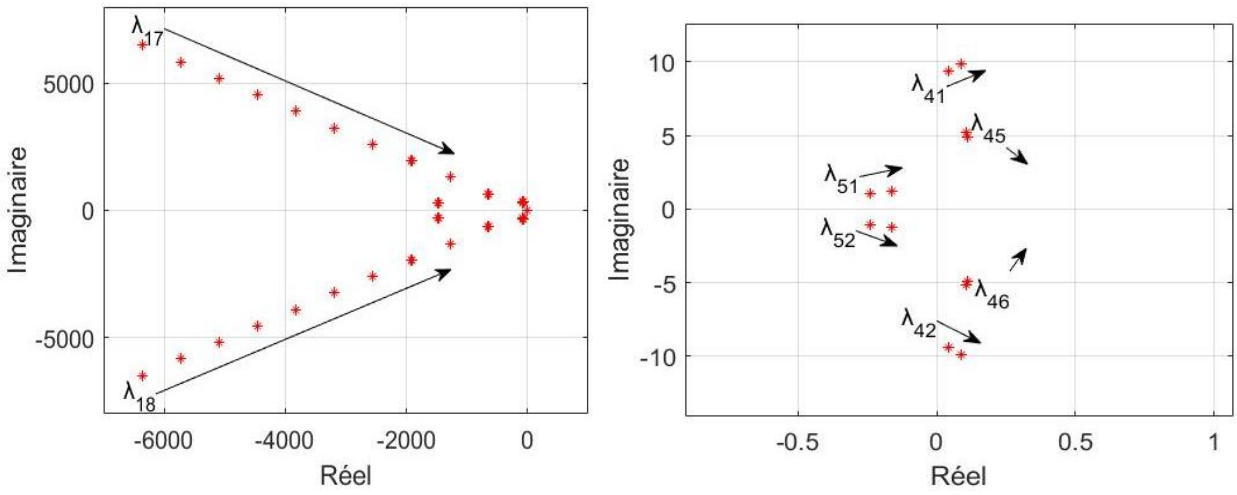


Fig.3.37 Évolution des valeurs propres sensibles à la variation de ω_c (20<ω_c<1000 (rad/s) avec ω_c décroissant).

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que toute valeur de ωc inférieure à 20 rad/s peut provoquer une instabilité du système. Les résultats de la première simulation, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec ωc = 20 rad/s, sont illustrés sur la Figure 3.38, et ceux de la seconde simulation avec ωc =15 rad/s sont présentés sur la Figure 3.39. Ces résultats confirment la stabilité

du système pour ωc > 20 rad/s, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état établi. Ce résultat confirme que les dynamiques internes des DGs ne peuvent pas être négligées lorsqu'on souhaite optimiser la dynamique des réglage primaires et secondaires du micro-réseau.

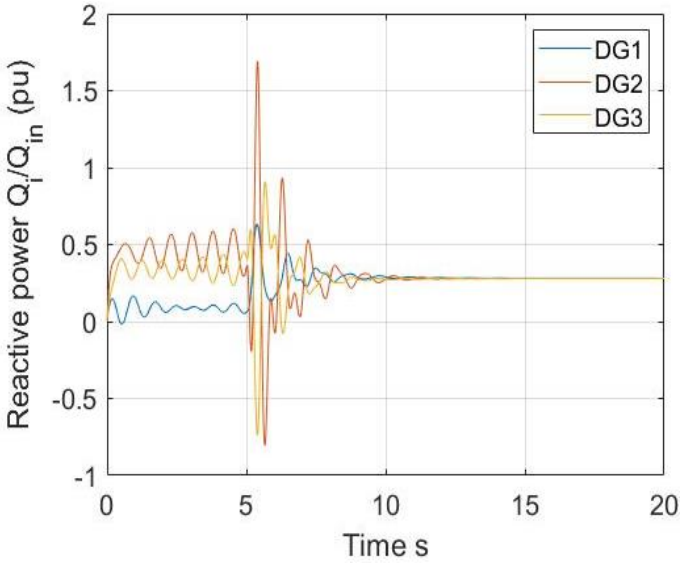


Fig.3.38 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωc = 20 rad/s.

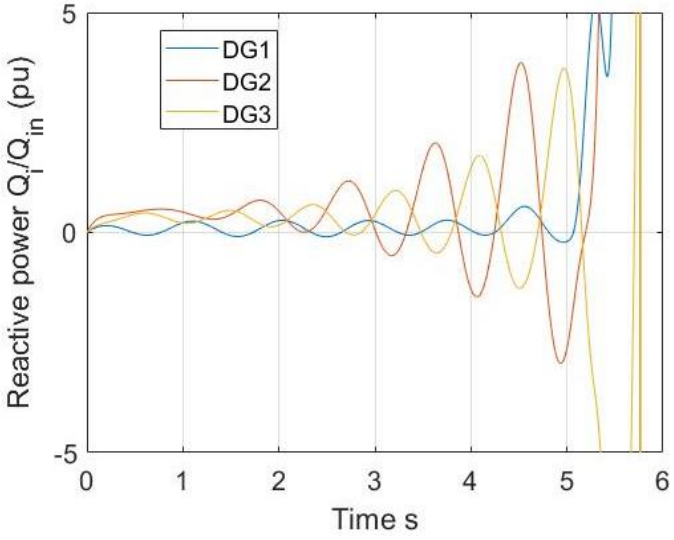


Fig.3.39 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape (les 3 DG sont connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s)) : avec ωc = 15 rad/s.

Pour évaluer l'impact des paramètres de contrôle droop sur la stabilité du système, la chute de fréquence Δ_ω est augmentée de sa valeur initiale à 20 fois cette valeur Les valeurs propres principalement impactées par cette variation sont λ31 à λ34 ainsi que λ39 à λ42 qui sont des nombres complexes conjugués deux à deux. Comme le montre la Figure 3.40 lorsque Δ_ω augmente, les valeurs les plus sensibles aux variations de Δ_ω se déplacent vers la droite de l'axe réel et deviennent positives pour $\Delta_\omega \geq 10$ rad/s.

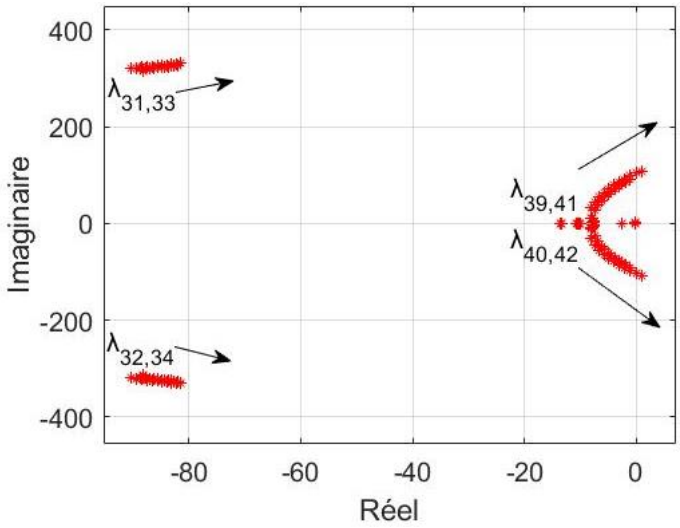


Fig.3.40 Évolution des valeurs propres sensibles à la variation de Δ_ω (0,5 < Δ_ω < 10 (rad/s)) avec Δ_ω croissant.

En suivant la même approche que pour ω_c, des simulations ont été réalisées pour vérifier que toutes valeurs de Δω supérieures ou égales à 10 rad/s peut provoquer l'instabilité du système. Les résultats de la première simulation, en utilisant le modèle Simscape avec Δω = 9,5 rad/s, sont illustrés sur la Figure 3.41 et ceux de la deuxième simulation avec Δω = 10 rad/s sont montrés sur la Figure 3.42. Ces résultats confirment l'instabilité du système pour Δω ≥ 10 rad/s, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état.

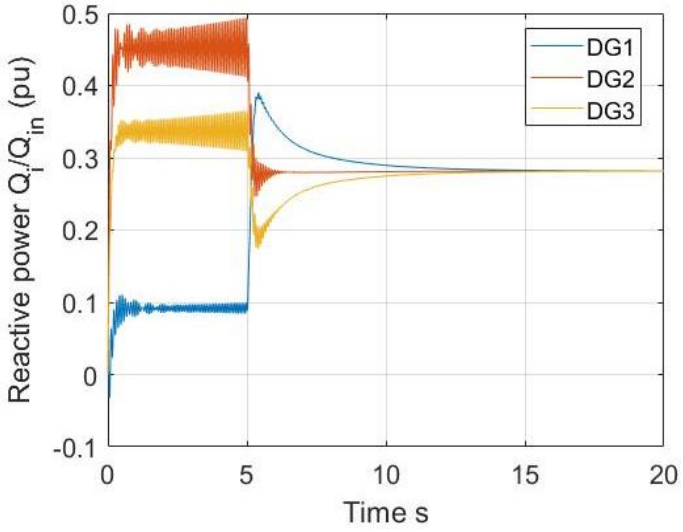


Fig.3.41 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : Δω = 9,5 rad/s

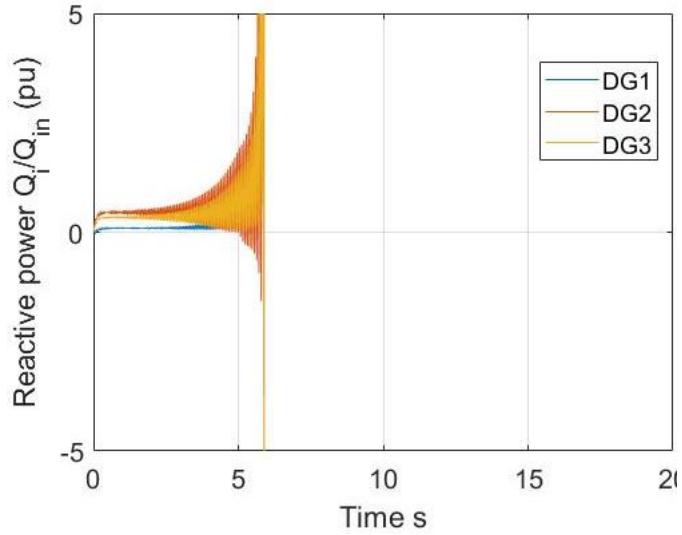


Fig.3.42 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : Δω = 10 rad/s

La chute de tension Δ_E est le dernier paramètre des DG pour lequel son impact sur la stabilité du système est étudié. Pour ce faire, nous avons fait varier Δ_E de sa valeur initiale à 5 fois cette valeur. Les valeurs propres principalement impactées par cette variation sont λ31, λ32, λ33, λ34, λ37 et λ38, qui sont des nombres complexes conjugués. Lorsque Δ_E augmente, comme le montre la figure 3.43, λ37 et λ38 se déplacent vers la gauche tandis que λ31 à λ34 se déplacent vers la droite et deviennent positives pour $\Delta_E \geq$ 25 V.

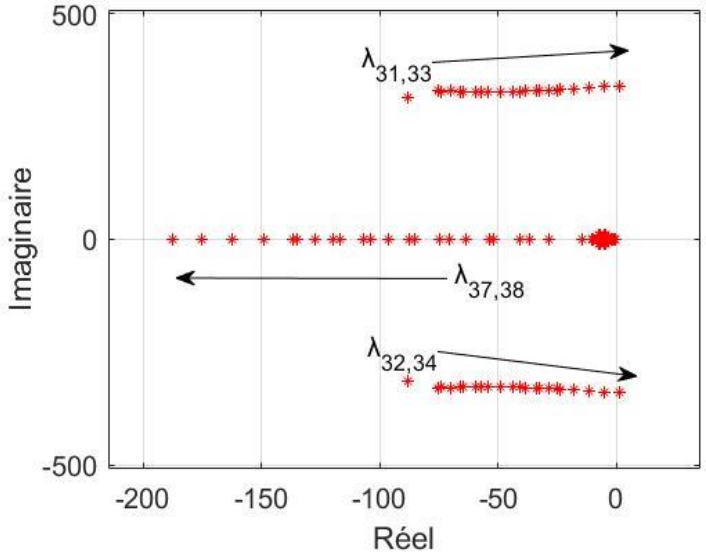


Fig.3.43 Évolution des valeurs propres avec la modification de la chute de tension $6 < \Delta_E < 30$ (V) avec Δ_E croissant.

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées pour vérifier que lorsque la valeur de Δ_E est supérieure ou égale à 25 V, le système devient instable. Les résultats de la première simulation, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec Δ_E =23 V, sont illustrés sur la Figure 3.43, et ceux de la seconde

simulation avec Δ_E =25 V sont présentés sur la Figure 3.44. Ces résultats confirment l'instabilité du système pour Δ_E ≥ 25 V, comme prévu par l'analyse de stabilité. Il a également été observé que des valeurs élevées de Δ_E affectent la dynamique d'équi-répartition de la puissance réactive.

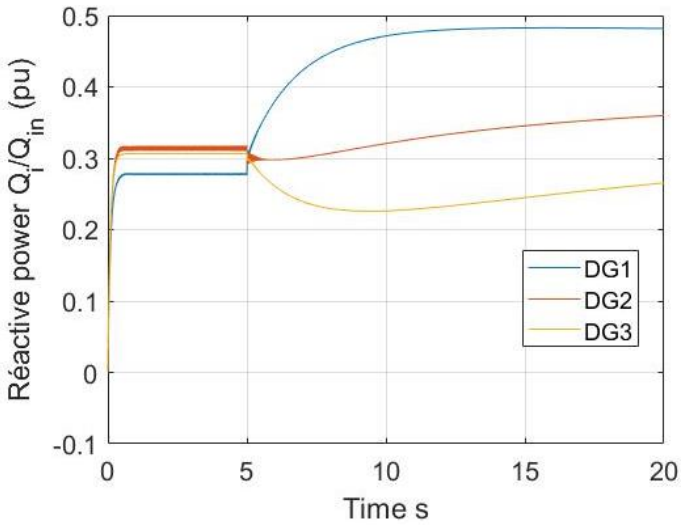


Fig.3.44 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : ΔE = 23 V

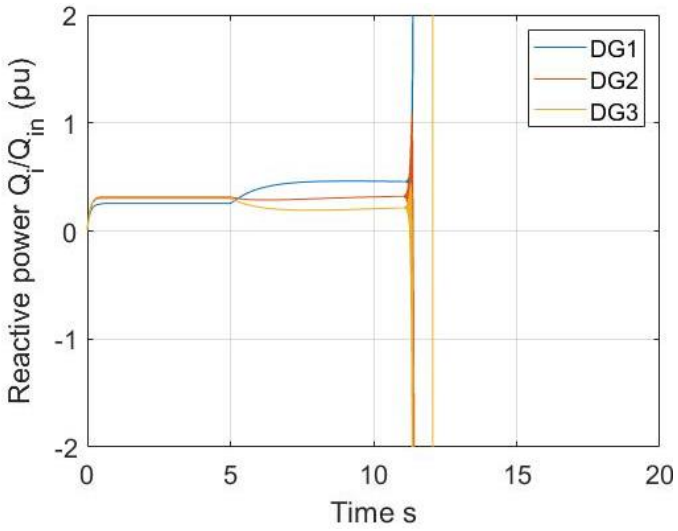


Fig.3.45 Évolution de la puissance réactive des DG (modèle Simscape, les 3 DG connectés à 0 s et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s) : ΔE = 25 rad/s

3.5.2.4. Influence des variations de charges sur la stabilité du micro-réseau

Comme dans le chapitre 2, afin d'expliquer l'effet de la variation des charges sur la stabilité du système, une étude de sensibilité sur les valeurs propres dominantes sous différentes conditions de charge est réalisée. Concernant les charges R-L, l'impact de leurs variations sur la stabilité du système est étudié en analysant l'évolution des valeurs propres principalement impactées par la variation sous facteur de puissance constant des charges R-L ($\frac{l\omega}{R} = cst$) du micro-réseau. La Figure 3.46

montre l'évolution des valeurs propres principalement impactées par une diminution jusqu'à 50% des impédances des charges RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant, respectivement. Les valeurs propres les plus impactées dans ce cas sont λ1 à λ12 ainsi que λ23 à λ28. On peut remarquer que lorsque la valeur de chaque charge RL varie, les valeurs propres λ1 à λ12 se déplacent vers la droite mais restent suffisamment négatives et n'impactent pas la stabilité du système.

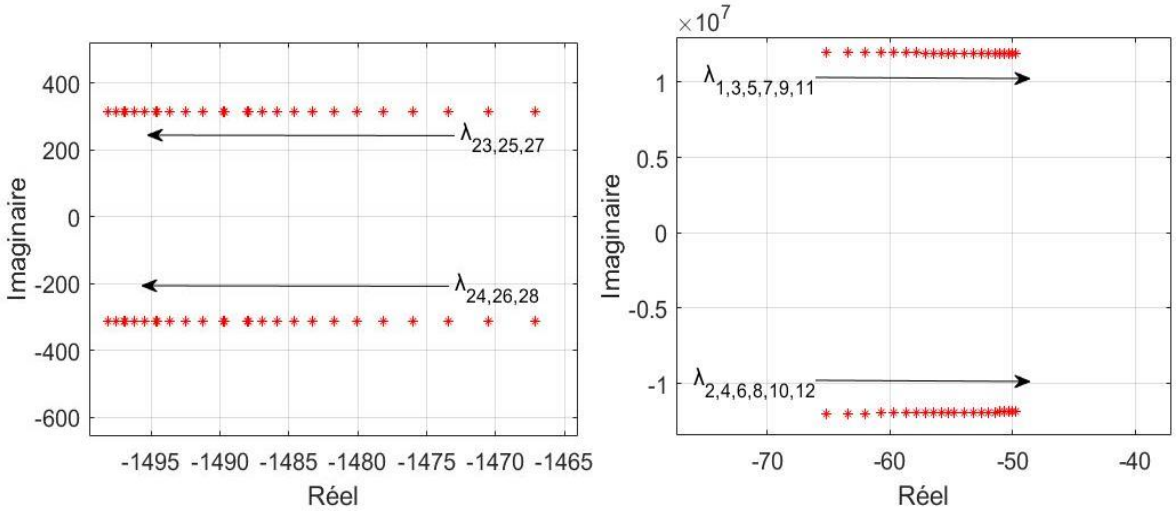
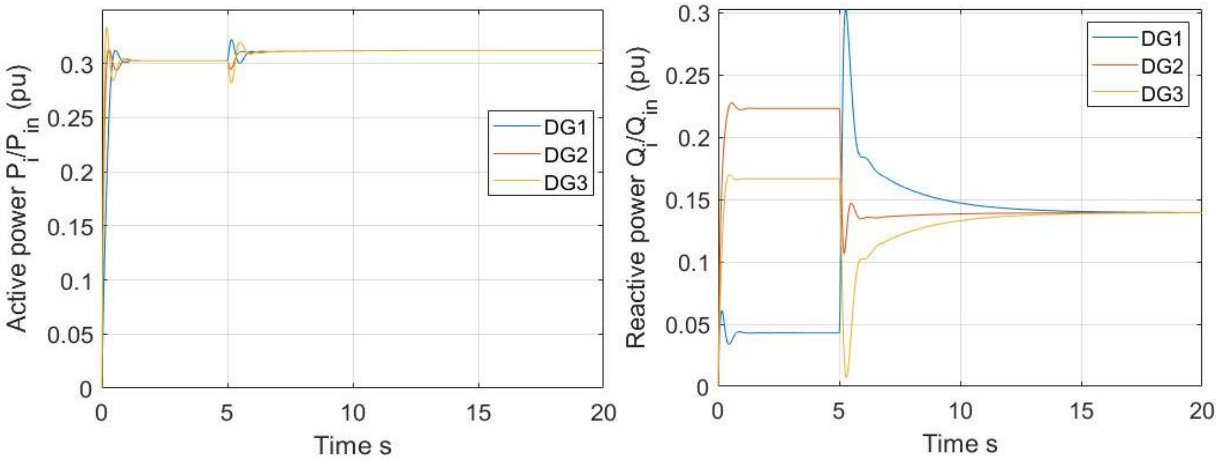


Fig.3.46 Evolution des valeurs propres correspondant à la diminution de RL-load1, RL-load2 et RL-load3 sous facteur de puissance constant.

Pour valider ces résultats, des simulations Simscape ont été réalisées afin de vérifier que la variation de la charge n'affecte pas la stabilité du système. Les résultats de la première simulation, réalisée à l'aide du modèle Simscape avec une diminution de 50% de l'impédance de toutes les charges sont illustrés sur les Figures 3.47a, b. Ces résultats confirment la stabilité du système après une grande variation de charge, comme prévu par l'analyse de stabilité basée sur le modèle d'état. Ils confirment également les résultats des tests de robustesse par rapport aux variations de charge (sections 3.2.5 et 3.2.6).



(a) (b)

Fig.3.47 Évolution des puissances actives (a) et réactives (b) des DG (les 3 DG connectés à 0 s avec 1/2 de la charge totale et la commande non linéaire est appliquée à t = 5s).

3.5.3. Analyse de la stabilité du contrôle secondaire

3.5.3.1. Modélisation du système pour son analyse de stabilité

La méthode est similaire à celle détaillée au paragraphe précédent. L'état du système va être augmenté des variables d'états introduites par les réglages secondaires. L'ordre du système considéré est maintenant de 62. On pose alors :

$[x]^T =$

$$[i_{13_d}\ i_{13_q}\ i_{23_d}\ i_{23_q}\ i_{25_d}\ i_{25_q}\ i_{14_d}\ i_{14_q}\ i_{56_d}\ i_{56_q}\ i_{46_d}\ i_{46_q}\ E_{1_d}\ E_{1_q}\ E_{2_d}\ E_{2_q}\ E_{6_d}\ E_{6_q}\ E_{3_d}\ E_{3_q}\ E_{4_d}\ E_{4_q}\ E_{5_d}\ E_{5_q}\ i_{CH1_d}\ i_{CH1_q}\ i_{CH2_d}\ i_{CH_q}\ i_{CH3_d}\ i_{CH3_q}\ P_{f1}\ Q_{f1}\ P_{f2}\ Q_{f2}\ P_{f3}\ Q_{f3}\ \delta\ \delta_1\ \dot{E}_{1_d}\ \dot{E}_{1_q}\ \dot{E}_{2_d}\ \dot{E}_{2_q}\ \dot{E}_{1_d}\ \dot{E}_{1_q}\ J_1\ J_2\ J_3\ X_1\ X_2\ X_3\ Y_1\ Y_2\ Y_3\ X_{\omega 1}\ X_{\omega 2}\ X_{\omega 3}\ Y_{v1}\ Y_{v2}\ Y_{v3}\ X_{v1}\ X_{v2}\ X_{v3}] \quad (3.41)$$

Le modèle global du micro-réseau est non linéaire et se présente sous la forme suivante :

$$\dot{x} = f(x) \text{ avec } f: R^n \to R^n, n = 62 \quad (3.42)$$

L'étude de stabilité sera réalisée en analysant les effets des changements des paramètres de lignes et du contrôle secondaire sur l'évolution des valeurs propres du système. Les paramètres du réglage primaire sont fixes et dimensionnés de manière à garantir la stabilité robuste du système sans réglage secondaire (voir section 3.5.2). Uniquement l'évolution des pôles basse fréquence liées aux réglages primaire et secondaire seront analysés. Comme le montre la figure 3.48 les paramètres de lignes influent peu sur les pôles basse fréquence liés aux réglages secondaires. Cette propriété est essentiellement due à la séparation des dynamiques entre réglage primaire et secondaire qui, lorsqu'elle est respectée, rend la synthèse des régulateurs secondaires indépendant des paramètres du micro-réseau.

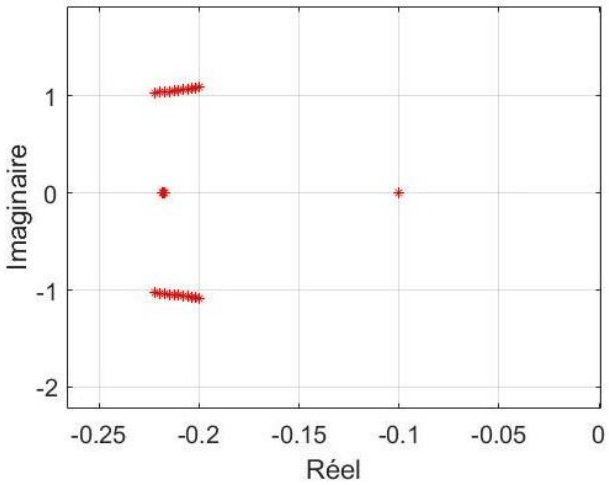
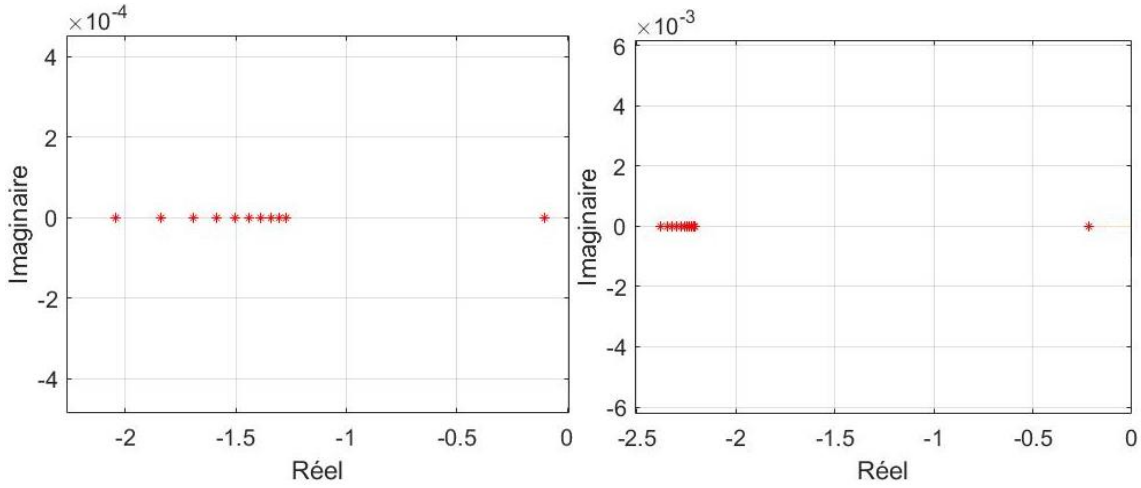


Fig.3.48 Évolution des valeurs propres sensibles aux changements des paramètres des lignes

La figure 3.49(a) présente l'évolution des pôles obtenus à l'aide du modèle simplifié et la figure 3.49(b) présente les pôles basse fréquence du modèle complet en fonction des paramètres de commande Kpv Kiv.

Ces résultats permettent de voir qu'effectivement la méthode décrite au paragraphe 3.3.2 permet de placer correctement les pôles du réglage secondaire sous réserve de respecter la séparation des dynamiques entre réglages primaire et secondaire.



(a) (b)

Fig.3.49 (a) Évolution des pôles obtenus à l'aide du modèle simplifié en fonction des paramètres de commande Kpv Kiv du réglage secondaire de tension. (b) Évolution des pôles basse fréquence du modèle complet en fonction des paramètres de commande Kpv Kiv.

3.6. Conclusion

Une stratégie de contrôle non linéaire basée sur le concept de consensus pour le contrôle primaire et secondaire dans les micro-réseaux maillés îlotés a été proposée. Le réglage primaire permet d'assurer un partage robuste de la puissance active et réactive des DG pour les micro-réseaux maillés à courant alternatif. A la différence des résultats du chapitre II, la mesure d'un potentiel commun envoyée à tous les DGs n'est plus nécessaire. Grace à l 'algorithme de consensus primaire proposé, il est possible en échangeant des informations de proche en proche, de générer un potentiel de référence commun. De même au niveau secondaire, l'échange d'informations en DGs voisins permet, grâce aux algorithmes de consensus développés de restaurer la fréquence et la tension du micro-réseau autour de leur valeur nominale sans affecter l'équi-répartion des puissances actives et réactives des DGs.

L'analyse de stabilité effectuée a permis d'évaluer la robustesse de la stratégie de contrôle à basse de consensus. Les dynamiques du réglage secondaire sont faiblement dépendantes de l'architecture électrique et dépendent principalement de la topologie du réseau de communication qui permet de faire transiter les informations entre DGs.

La commande décentralisée proposée au chapitre 2 partage de nombreuses fonctionnalités avec la commande distribuée de ce chapitre. Une analyse comparative de ces deux sont présentée dans le tableau 3.4.

Table 3.4 Étude comparative entre les contrôles proposés pour le partage du pouvoir dans les chapitres 2 et 3

	Contrôle décentralisé (chap 2)	Contrôle distribué (chap 3)
Efficacité pour le partage de la puissance des DG	Efficacité validée par simulation et par des tests HIL 	Efficacité validée par simulation et par des tests HIL 
La robustesse face à la variation des charges	Robustesse validée par simulation, par des tests HIL et par analyse de stabilité 	Robustesse validée par simulation, par des tests HIL et par analyse de stabilité 
La robustesse par rapport aux changements de topologie	Robustesse validée par simulation, par des tests HIL et par analyse de stabilité 	Robustesse validée par simulation, par des tests HIL et par analyse de stabilité 
La robustesse par rapport aux délais de communication	Délai de communication qui affecte la stabilité du micro réseau et 1.4 s	Délai de communication qui affecte la stabilité du micro réseau et 110 ms
Efficacité du partage de la puissance des DG lorsqu'une erreur de communication apparaît	Le partage des puissances de tous le DGs est perdus lorsqu'une erreur de communication apparaît 	Le partage de la puissance de tous les DG est maintenu lorsqu'une erreur de communication se produit et seul le DG qui est déconnecté perd le partage de sa puissance réactive avec les autres DG. 

Chapitre 3 : Contrôles primaires et secondaires distribués basés sur le consensus dans les micro-réseaux maillés îlotés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette thèse se concentre sur les stratégies de contrôle des micro-réseaux maillés soit îlotés soit connectés au réseau. Après un état de l'art sur l'architecture et les stratégies de commande des micro-réseaux, nous avons montré que le contrôle de la plupart des micro-réseaux est assuré par le contrôle distribuées de leurs générateurs distribués (DGs). Dans ce cas, ce contrôle est souvent assuré par le contrôle Droop distribués des DGs afin d'améliorer la fiabilité du système et avoir la propriété de "Plug and Play" de ces sources distribuées. Cette approche de contrôle Droop permet également d'intégrer le contrôle primaire, secondaire et tertiaire des micro-réseaux en agissant sur le contrôle des convertisseurs de puissance associés à ces DGs. Cependant, la plupart des méthodes de contrôle proposées basées sur la commande Droop, qui devrait notamment assurer un partage des puissances consommées entre les DGs d'un micro-réseau, ne sont efficace que pour les micro-réseaux de type mono-PCC à topologie simple. En effet elles ne sont souvent pas efficaces pour le contrôle des micro-réseaux maillés, et notamment pour le partage des puissances entre leurs DGs, en raison des complexités et des couplages introduites par les impédances non-négligeables des lignes interconnectant les différents nœuds de ces micro-réseaux.

L'objectif principal des travaux menés est donc de résoudre les problèmes de commande Droop pour les miro-réseaux maillés, qu'ils soient îlotés ou connectés au réseau principal. Pour cette raison au deuxième chapitre, une stratégie de contrôle non-linéaire à base de Droop a été proposée et appliquée pour la synchronisation et le partage des puissances active et réactive entre les DGs d'un micro-réseau îloté multi-PCC maillé. Cette de commande droop non-linéaire est ensuite adaptée pour le partage des puissances active et réactive entre les DGs des micro-réseaux maillés connectés au réseau. La stratégie de synchronisation est également adaptée pour un transfert sans-à-coup du mode de fonctionnement îloté au mode de fonctionnement connecté au réseau. De plus, des termes supplémentaires sont ajoutés à la commande Droop non-linéaire initiale pour assurer le réglage tertiaire afin de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau principal. Les différents tests de simulation à l'aide de Simscape et de hardware in the loop à l'aide de Dspace et OPAL-RT ont prouvé l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée. La robustesse de la stratégie de contrôle proposée, par rapport aux changements de la topologie et variations brusques des puissances des charges, est également vérifiée avec succès dans les deux modes de fonctionnement îloté ou connecté au réseau. Pour appliquer le contrôle non linéaire pour le partage de la puissance entre les DGs, les contrôleurs locaux des DGs ont besoin d'une information commune sur la tension mesurée d'un nœud pilote, par lequel le micro-réseau peut être connecté au réseau principal. Plusieurs tests considérant différentes valeurs du délai de communication ont mis en évidence que la stratégie de contrôle proposée est suffisamment robuste face au retard de communication pour être appliquée de manière pratique au contrôle des DGs des micro-réseaux maillés.

La stabilité du micro-réseau maillé considéré est aussi étudiée à l'aide d'un modèle d'état proposé du système intégrant les commandes Droop des DGs. Après avoir validé ce modèle par simulation en vérifiant qu'il décrive le vrai comportement dynamique du micro-réseau considéré, l'analyse de stabilité du système non linéaire considéré à chaque point de fonctionnement a été effectuée en examinant les valeurs propres de la matrice jacobéenne du modèle d'état établi. Il a été constaté que les paramètres du système les plus influents sur la stabilité du micro-réseau maillé considéré étaient les paramètres de contrôle Droop des DGs et la puissance active des charges à puissance constante (CPL) qui y sont connectés. Le choix des paramètres du contrôle Droop non linéaire proposé a été effectué à l'aide d'un modèle simplifié proposé pour les micro-réseaux maillés, qui a été validé par le modèle complet du micro réseau considéré.

Le seul point faible de la commande proposée au deuxième chapitre pour le contrôle des micro-réseaux maillés est sa dépendance à une information unique d'un nœud pilote pour assurer le partage précis de la puissance réactive consommée entre les DGs, même si le partage de la puissance active consommée entre les DGs reste précis. Pour éviter ce point faible, nous proposons au chapitre

3, une nouvelle approche assurant le contrôle distribué des DGs des micro-réseaux îlotés en se basant sur la théorie de consensus, développée d'abord par les informaticiens et adoptée ensuite par les automaticiens.

Ainsi, en se basant sur cette approche basée le consensus, le contrôle de chaque DG du micro-réseau maillé ne nécessite qu'une communication à bas débit afin de connaitre la tension de sortie des DGs voisins. De ce fait, même en cas de perte d'une information sur la tension de sortie d'un DG, les commandes Droop proposée pour les DGs assurent le partage des puissances consommée entre les DGs. Les différents tests de simulation à l'aide de Simscape et de hardware in the loop à l'aide de Dspace et OPAL-RT ont prouvé l'efficacité et la robustesse de la stratégie de contrôle proposée. Même si elle est capable d'assurer un partage de puissance précis et robuste des puissances active et réactive entre les DGs, la stratégie proposée cause la déviation des tensions et des fréquences de leurs valeurs nominales. Par conséquence, un contrôle secondaire basé sur le consensus pour rétablir la fréquence et la tension de chaque DG à leurs valeurs nominales sans affecter les propriétés de partage de la puissance est également proposé et étudier dans ce chapitre. Comme pour le réglage primaire, l'efficacité du réglage secondaire est prouvée par simulation et valider par des tests HIL. L'analyse de stabilité, effectuée à l'aide du modèle d'état établi au 2ème chapitre et adapté pour la commande par consensus proposée au 3ème chapitre, a permis d'évaluer la robustesse de la stratégie de contrôle à base de consensus. La conception des régulateurs pour les deux couches de contrôle (primaire et secondaire) de ce chapitre est effectuée localement sans besoins de connaissance de la topologie du micro réseau. Le choix des paramètres des contrôleurs est validé à l'aide du modèle d'état du micro-réseau intégrant les commandes proposées pour ses DGs.

Les résultats des travaux de recherche menés ouvrent également des perspectives pour les travaux de futures à développer à court et moyen termes :

- Sur la base des contrôles proposés dans les chapitres 2 et 3, des dispositifs de stockage peuvent être modélisés et ajoutés aux DGs pour étudier l'impact des états de charge des éléments de de stockage distribués sur le partage de la puissance entre les DGs et la stabilité des micro-réseaux maillés îlotés.
- Le contrôle primaire distribué basé sur le consensus du chapitre 3 peut être exploité sans avoir besoin d'un maître. Les trois références de potentiel de tension qui sont sensé converger vers la tension de sortie du DG maitre pour assurer le partage de puissance réactive des DGs vont converger vers une valeur constante qui sera suffisante pour que les contrôleurs non linéaires des DGs réalisent le partage de puissance.
- Comme pour le contrôleur secondaire, il peut également être utilisé sans avoir besoin d'un maître. L'algorithme de consensus peut donc être conçu de manière à ce que la moyenne des tensions de sortie des DGs converge vers la valeur nominale.
- Un réglage tertiaire distribué à base du consensus peut aussi être implémenter pour contrôler les échanges de puissance après la connexion du micro réseau au réseau principale.

Conclusion générale

Liste des publications

Liste des publications

Publications dans des journaux internationaux à comité de lecture :

- **Youssef Hennane, Jean-Philippe Martin, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, and Farid Meibody-Tabar**, "Power Sharing and Synchronization Strategies for Multiple PCC Islanded Microgrids," International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, Vol. 9, No. 3, pp. 156-162, May 2020. Doi: 10.18178/ijeetc.9.3.156-162.
- **Hennane, Y.; Berdai, A.; Martin, J.-P.; Pierfederici, S.; Meibody-Tabar, F.** New Decentralized Control of Mesh AC Microgrids: Study, Stability, and Robustness Analysis. Sustainability 2021, 13, 2243. Doi: https://doi.org/10.3390/su13042243.
- **Youssef Hennane, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar, Jean-Philippe Martin**, Novel non-linear control for synchronization and power sharing in islanded and grid-connected mesh microgrids, Electric Power Systems Research, Volume 208, 2022, 107869, ISSN 0378-7796 https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107869.
- Après sa sélection par le comité de la conférence, une version extended de l'article de conférence **"**Consensus-based distributed primary control for accurate power sharing in islanded mesh microgrids" qui a été présenter au (Electrimacs 2022) est envoyée au journal international « Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM) » pour évaluation afin qu'il soit publié comme article de revue.

Communications, participation congrès, colloques, séminaires :

- **Youssef Hennane, Jean-Philippe Martin, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, and Farid Meibody-Tabar**, "Power Sharing and Synchronization Strategies for Multiple PCC Islanded Microgrids", 2nd International Conference on Power and Energy Technology (ICPET 2019),14 - 16 octobre 2019), Rabat.
- **Youssef Hennane, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar, Vitaliy Kuznetsov**, "Study and modelling of droop-controlled islanded mesh microgrids", 2nd international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters (ICSF 2021) 19-21 may, 2021, KRYVYI RIH, UKRAINE». DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005015
- **Youssef Hennane, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar, Jean-Philippe Martin, Milad Bahrami**, «Accurate Power Sharing and Synchronization Strategies in

Mesh Islanded or Grid-Connected Microgrids," 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE), 2021, pp. 28-33, doi: 10.1109/ICPSE53473.2021.9656859.

- **Youssef Hennane, Jean-Philippe Martin, Abdelmajid Berdai, Serge Pierfederici, and Farid Meibody-Tabar**, "Micro-réseaux multi-sources maillés isolés : équirépartition des puissances et synchronisation", Symposium de Génie Electrique 2020 reporté en 2021 (SGE2021), 6-8 juillet 2021, Nantes, France.
- **Youssef Hennane, Abdelmajid Berdai, Jean-Philippe Martin, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar**, “Consensus-based distributed primary control for accurate power sharing in islanded mesh microgrids”, 14th International Conference of the International Association for Mathematics and Computer in Simulation (Electrimacs 2022), 16-19 May 2022 Nancy (France).

Liste des publications

Bibliographie

Bibliographie

[1] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014

[2] H. Karimi, H. Nikkhajoei, and M. R. Iravani, “Control of an electronically-coupled distributed resource unit subsequent to an islanding event,” IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 1, pp. 493–501, Jan. 2008.

[3] Abolghasem Sardashti, Amin Ramezani, Fault tolerant control of islanded AC microgrids under sensor and communication link faults using online recursive reduced-order estimation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 126, Part A, 2021, 106578.

[4] R. Majumder, "Some Aspects of Stability in Microgrids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3243-3252, Aug. 2013

[5] S. Ullah, L. Khan, I. Sami and N. Ullah, "Consensus-Based Delay-Tolerant Distributed Secondary Control Strategy for Droop Controlled AC Microgrids," in IEEE Access, vol. 9, pp. 6033-6049, 2021

[6] Sudipta Chakraborty, Simôes Marcelo G., and William E. Kramer. Power Electronics for enewable and Distributed Energy Systems A Sourcebook of Topologies, Control and Integration. Springer, 2013.

[7] X. Haizhen, Z. Xing, L. Fang, Z. Debin, S. Rongliang, N. Hua, and C.Wei, “Synchronization strategy of microgrid from islanded to grid-connected mode seamless transfer,” presented at IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), 2013.

[8] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process,” IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 248–257, Jan. 2005.

[9] Y. Hennane, A. Berdai, J.-P. Martin, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, “New Decentralized Control of Mesh AC Microgrids: Study, Stability, and Robustness Analysis,” Sustainability, vol. 13, no. 4, p. 2243, Feb. 2021.

[10] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulous, R. Yinger, and J. Eto, “White Paper on Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS Microgrid Concept,” LBNL-50829 Office of Power Technologies, the US Department of Energy, Berkeley, CA, 2002, Tech. Rep. DE-AC03-76SFW098.

[11] T. V. Hoang and H. Lee, "An Adaptive Virtual Impedance Control Scheme to Eliminate the Reactive-Power-Sharing Errors in an Islanding Meshed Microgrid," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, no. 2, pp. 966-976, June 2018

[12] Pramod P. Khargonekar, Munther A. Dahleh, Advancing systems and control research in the era of ML and AI, Annual Reviews in Control, Volume 45, 2018, Pages 1-4

[13] Tao Wu, Jianhui Wang, Artificial intelligence for operation and control: The case of microgrids, The Electricity Journal, Volume 34, Issue 1, 2021, 106890

[14] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla,“Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids; Ageneral approach toward standardization,” IEEE Trans. Ind. Electron.,vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.

[15] A. Bidram and A. Davoudi, “Hierarchical structure of microgrids control system,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, Dec. 2012.

[16] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, “Advanced control architectures for intelligent microgrids, part i: decentralized and hierarchical control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013.

[17] L. Meng, F. Tang, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Tertiary control of voltage unbalance compensation for optimal power quality in islanded microgrids,” Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 4, pp. 802–815, 2014.

[18] N. Hatziargyriou, Ed., Microgrids: Architectures and Control. Wiley-IEEE Press, Mar. 2014.

[19] Natarajan Prabaharan, Amalorpavaraj Rini Ann Jerin, Ehsan Najafi, and Kaliannan Palanisamy. 6 – an overview of control techniques and technical challenge for inverters in micro grid. In A. Hina Fathima, N. Prabaharan, K. Palanisamy, Akhtar Kalam, Saad Mekhilef, and Jackson. J. Justo, editors, Hybrid- Renewable Energy Systems in Microgrids, Woodhead Publishing Series in Energy, pages 97 – 107. Woodhead Publishing, 2018.

[20] Gaëtan Beneux, Pierre Riedinger, Jamal Daafouz, and Louis Grimaud. Adaptive stabilization of switched affine systems with unknown equilibrium points: Application to power converters. Automatica, 99:82 – 91, 2019.

[21] A. Sferlazza, C. Albea-Sanchez, L. Martínez-Salamero, G. García, and C. Alonso. Min-type control strategy of a dc–dc synchronous boost converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(4): 3167–3179, 2020.

[22] F. D¨orfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo, “Breaking the hierarchy: Distributed control and economic optimality in microgrids,” IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 3, no. 3, pp. 241–253, 2015.

[23] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, “Control of power converters in ac microgrids,” IEEE transactions on power electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.

[24] Ettore Bompard, Andrea Mazza, Lucian Toma, Chapter 3 - Classical grid control: Frequency and voltage stability, Editor(s): Antonello Monti, Federico Milano, Ettore Bompard, Xavier Guillaud, Converter-Based Dynamics and Control of Modern Power Systems, Academic Press, 2021, Pages 31-65.

[25] M. A. Shahab, B. Mozafari, S. Soleymani, N. M. Dehkordi, H. M. Shourkaei and J. M. Guerrero, "Distributed Consensus-Based Fault Tolerant Control of Islanded Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 1, pp. 37-47, Jan. 2020.

[26] M. Yazdanian and A. Mehrizi-Sani, “Distributed control techniques in microgrids,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2901–2909, 2014.

[27] F. Guo, C. Wen, J. Mao, and Y. D. Song, “Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverterbased microgrids,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 7, pp. 4355–4364, Jul. 2015.

[28] P. C. Loh, M. J. Newman, D. N. Zmood, and D. G. Holmes, “A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase ups systems,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 5, pp. 1176–1185, 2003.

[29] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, 2007.

[30] M. Prodanovic and T. C. Green, “Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 1, pp. 373–380, 2003.

[31] Hassan Moussa. Contribution to the Decentralized Energy Management of Autonomous AC-Microgrid. Electric power. Université de Lorraine, 2017.

[32] E. Twining and D. G. Holmes, “Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an lcl input filter,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 3, pp. 888–895, 2003.

[33] J.-I. Jang and D.-C. Lee, “High performance control of three-phase pwm converters under nonideal source voltage,” in Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on. IEEE, 2006, pp. 2791–2796.

[34] L. Li and K. M. Smedley, “A new analog controller for three-phase four-wire voltage generation inverters,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 7, pp. 1711–1721, 2009.

[35] T. Liu, X. Hao, X. Yang, J. Liu, B. Zhang, and L. Huang, “A novel current dual-loop control strategy for three-phase grid-connected vsi with lcl filter,” in Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International, vol. 1. IEEE, 2012, pp. 626–630.

[36] A. E. M. Shahin, “Contribution à l’optimisation des structures de conversion dc/dc non isolées,” Ph.D. dissertation, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011.

[37] A. Houari, “Contribution à l’étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques,” Ph.D. dissertation, Université de Lorraine, 2012.

[38] H. Renaudineau, “Hybrid renewable energy sourced system: Energy management & self-diagnosis,” Ph.D. dissertation, Université de Lorraine, 2013.

[39] T. K. Roy, M. A. Mahmud, A. M. T. Oo, M. E. Haque, K. M. Muttaqi and N. Mendis, "Nonlinear Adaptive Backstepping Controller Design for Islanded DC Microgrids," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2857-2873, May-June 2018

[40] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, “A voltage and frequency droop control method for parallel inverters,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, 2007.

[41] J. M. Guerrero, J. Matas, D. Vicuna, L. García, M. Castilla, and J. Miret, “Wirelesscontrol strategy for parallel operation of distributed-generation inverters,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 5, pp. 1461–1470, 2006.

[42] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, “Control of distributed uninterruptible power supply systems,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 8, pp. 2845–2859, 2008.

[43] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, “A voltage and frequency droop control method for parallel inverters,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1390 - 1420, Apr. 2007.

[44] R. Moslemi, J. Mohammadpour and A. Mesbahi, "A modified droop control for reactive power sharing in large microgrids with meshed topology," 2016 American Control Conference (ACC), 2016.

[45] C. N. Papadimitriou, E. I. Zountouridou, and N. D. Hatziargyriou. "Review of hierarchical control in DC microgrids." Electr. Power Syst. Res. Vol. 122, pp. 159-167, 2015.

[46] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 7, pp. 4876- 4891, July 2016.

[47] F. Nejabatkhah and Y. W. Li, "Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 12, pp. 7072-7089, Dec. 2015.

[48] Wilson Jasmine Praiselin, J. Belwin Edward, 3 - Integrated renewable energy sources with droop control techniques-based microgrid operation, Editor(s): A. Hina Fathima, N. Prabaharan, K. Palanisamy, Akhtar Kalam, Saad Mekhilef, Jackson. J. Justo, In Woodhead Publishing Series in Energy, Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids, Woodhead Publishing, 2018, Pages 39-60.

[49] X.Yu, A.M.Khambadkone, H.Wang, and S. T. S. Terence, “Control of parallel-connected power converters for low-voltage microgrid—Part I: A hybrid control architecture,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 12, pp. 2962–2970, Dec. 2010.

[50] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, “Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 3, pp. 689–701, Mar. 2011.

[51] M. B. Delghavi and A. Yazdani, “An adaptive feedforward compensation for stability enhancement in droop-controlled inverter-based microgrids,” IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 3, pp. 1764–1773, Jul. 2011.

[52] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, and F. Zare, “Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation,” Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, no. 4, pp. 2768–2778, 2010.

[53] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, “Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop,” Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 25, no. 2, pp. 796–808, 2010.

[54] J. M. Guerrero, D. Vicuña, L. García, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, “Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 52, no. 4, pp. 1126–1135, 2005.

[55] J. M. Guerrero, N. Berbel, J. Matas, J. L. Sosa, D. Vicuña, and L. García, “Droop control method with virtual output impedance for parallel operation of uninterruptible power supply systems in a microgrid,” in Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE. IEEE, 2007, pp. 1126–1132.

[56] J. He and Y. W. Li, “Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 6, pp. 2525–2538, 2011.

[57] E. Rokrok and M. E. H. Golshan, “Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid,” Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 4, no. 5, pp. 562–578, 2010.

[58] M. Yazdanian and A. Mehrizi-Sani, “Washout filter-based power sharing,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, pp. 967–968, 2015.

[59] M. Prodanović and T. C. Green, “High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 5, pp. 1471–1482, Oct. 2006.

[60] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, “Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. 1749–1761, 2017.

[61] Z. Lyu, Q. Wei, Y. Zhang, J. Zhao, and E. Manla, “Adaptive virtual impedance droop control based on consensus control of reactive current,” Energies, vol. 11, no. 7, 2018.

[62] V. Nasirian, Q. Shafiee, J. M. Guerrero, F. L. Lewis, and A. Davoudi, “Droop-free team-oriented control for AC distribution systems,” Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, vol. 2015-May, no. May, pp. 2911–2918, 2015.

[63] V. Nasirian, Q. Shafiee, J. M. Guerrero, F. L. Lewis, and A. Davoudi, “Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 1600–1617, feb 2016.

[64] T. Vicsek, A.Czirok, E.Ben-Jacob, et al. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles[J]. Phys.Rev.Lett, 1995, 75: 1226-1229.

[65] R.Olfati-Saber, R.M.Murray. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(9):1520-1533.

[66] L.Moreau. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2005, 50(2):169-182.

[67] M.Porfiri, D.G.Roberson, D.J.Stilwell. Tracking and formation control of multiple autonomous agents: A two-level consensus approach[J]. Automatica, 2007, 43(8):1318-1328.

[68] A.Jadbabaie, J.Lin, A.S.Morse. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2003, 48(6): 988-1001.

[69] F.Guo, C.wen, J.Mao, et al. Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Micro-grids[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2015, 62(7) : 4355-4364.

[70] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, Guerrero J M, 2013. Distributed cooperative secondary control of micro-grids using feedback linearization[J], IEEE Trans.Power Systems, 28(3): 3462-3470.

[71] Bidram A,Davoudi A, Lewis F L. A multiobjective distributed control framework for islanded AC micro-grids[J], IEEE Transactions on. Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1785-1798.

[72] Porco S W J, Dorfler F,Bullo F, 2013.Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded micro-grids[J], Automatica, 49(9): 2603- 2611.

[73] S. M. Mohiuddin and J. Qi, “Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids with Precisely Regulated Voltage Variance and Admissible Voltage Profile Guarantees,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. to be publ, 2019.

[74] Y. Khayat, M. Naderi, Q. Shafiee, Y. Batmani, M. Fathi, J. M. Guerrero, and H. Bevrani, “Decentralized optimal frequency control in autonomous microgrids,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 3, pp. 2345–2353, 2018.

[75] G. Lou, W. Gu, L. Wang, B. Xu, M. Wu, and W. Sheng, “Decentralized secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrid based on adaptive state estimator,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 15, pp. 3683–3693, 2017.

[76] K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So, Y. C. Chu and M. Z. Q. Chen, "Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1977-1987, Dec. 2012.

[77] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Reactive Power Sharing and Voltage Harmonic Distortion Compensation of Droop Controlled Single Phase Islanded Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 3, pp. 1149-1158, May 2014

[78] J. Hu and P. Bhowmick, ‘‘A consensus-based robust secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrids,’’ Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 116, Mar. 2020, Art. no. 105575.

[79] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and J. M. Guerrero, ‘‘Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization,’’ IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3462–3470, Aug. 2013.

[80] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dörfler, J. C. Vásquez, J. M. Guerrero, and F. Bullo, “Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, pp. 7025–7038, nov 2015.

[81] J. W. Simpson-Porco, F. Dorfler, and F. Bullo, “Synchronization and ¨ power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids,” Automatica, vol. 49, no. 9, pp. 2603–2611, 2013.

[82] M. Andreasson, D. V. Dimarogonas, K. H. Johansson, and H. Sandberg, “Distributed vs. centralized power systems frequency control under unknown load changes,” in Proc. ECC, Zurich, Switzerland, Jul. 2013, ¨ pp. 3524–3529.

[83] F. Dorfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo, “Breaking the hierarchy: ¨ Distributed control & economic optimality in microgrids,” IEEE Trans. Control Net. Syst., vol. 3, no. 3, pp. 241–253, 2016.

[84] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dorfler, J. M. Vasquez, J. M. Guerrero, and F. Bullo, “Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 11, pp. 7025–7038, 2015.

[85] K. De Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, “Control of microgrids,” in Proc. IEEE Power Engineer. Soc. General Meet., Jun. 2007, pp. 1–7.

[86] N. M. Dehkordi, N. Sadati and M. Hamzeh, "Fully Distributed Cooperative Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 2, pp. 675-685, June 201

[87] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and Z. Qu, “Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, no. 8, pp. 822–831, 2013.

[88] Dheer, D.K.; Kulkarni, O.V.; Doolla, S.; Rathore, A.K. Effect of Reconfiguration and Meshed Networks on the Small-Signal Stability Margin of Droop-Based Islanded Microgrids. IEEE Trans. Ind. Appl. 2018, 54, 2821–2833.

[89] Trivedi, A.; Singh, M. Adaptive Droop Control for AC Microgrid with Small Mesh Network. IEEE Trans. Ind. Electron. 2018, 65, 4781–4789.

[90] Jusoh, A.B. The instability effect of constant power loads. In Proceedings of the National Power and Energy Conference PECon 2004, Kuala Lumpur, Malaysia, 29–30 November 2004; pp. 175–179.

[91] Cespedes, M.; Xing, L.; Sun, J. Constant-power load system stabilization by passive damping. IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 1832–1836.

[92] Marx, D.; Magne, P.; Nahid-Mobarakeh, B.; Pierfederici, S.; Davat, B. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—A review. IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 1773–1787.

[93] Kabalan, M.; Singh, P.; Niebur, D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: A review. IEEE Trans. Smart Grid 2016, 8, 2287–2295.

[94] Bottrell, N.; Prodanovic, M.; Green, C.T. Dynamic stability of a microgrid with an active load. IEEE Trans. Power Electron. 2013, 28, 5107–5119.

[95] Rasheduzzaman, M.; Mueller, J.A.; Kimball,W.J. An accurate small-signal model of inverter-dominated islanded microgrids using dq reference frame. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2014, 2, 1070–1080.

[96] D. Baros, N. Rigogiannis, N. Papanikolaou and M. Loupis, "Investigation of Communication Delay Impact on DC Microgrids with Adaptive Droop Control," 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), 2020, pp. 1-6

[97] M. Saleh, Y. Esa, A. Mohamed, “Impact of Communication Latency on the Bus Voltage of Centrally Controlled DC Microgrids During Islanding,” IEEE Trans. Sust. Energy, vol. 10, no. 4, pp. 1844–1856, Oct. 2019.

[98] C. Lee, R. Jiang and P. Cheng, "A Grid Synchronization Method for Droop-Controlled Distributed Energy Resource Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 2, pp. 954-962, March-April 2013.

[99] X. Haizhen, Z. Xing, L. Fang, Z. Debin, S. Rongliang, N. Hua, and C.Wei, “Synchronization strategy of microgrid from islanded to grid-connected mode seamless transfer,” presented at IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), 2013.

[100] S. Paghdar, U. Sipai, K. Ambasana and P. J. Chauhan, "Active and reactive power control of grid connected distributed generation system," 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017.

[101] K.-L. Nguyen, D.-J. Won, S.-J. Ahn, and I.-Y. Chung, “Power Sharing Method for a Grid connected Microgrid with Multiple Distributed Generators,” Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 7, no. 4. The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 459–467, 01-Jul-2012.

[102] Tayaba, U.B.; Roslan, M.A.B.; Hwai, L.J.; Kashif, M. A review of droop control techniques for microgrid. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 76, 717–727.

[103] Moussa, H.; Shahin, A.; Martin, J.-P.; Pierfederici, S.; Moubayed, N. Optimal angle droop for power sharing enhancement with stability improvement in islanded microgrids. IEEE Trans. Smart Grid 2017, 9, 5014–5026.

[104] F. Aalipour and T. Das, "Proportional Power-Sharing Control of Distributed Generators in Microgrids," in IEEE Transactions on Control Systems Technology (early access) pp. 1-14, April 2021.

[105] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, ‘‘Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droopcontrolled microgrid,’’ IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 797–807, Jun. 2012.

[106] H. R. Baghaee, G. B. Gharehpetian, and M. Mirsalim, ‘‘Real-time verification of new controller to improve small/large-signal stability and fault ride-through capability of multi-DER microgrids,’’ IET Gener., Transmiss. Distrib., vol. 10, no. 12, pp. 3068–3084, Sep. 2016.

[107] Y. Seyedi, H. Karimi, and J. M. Guerrero, ‘‘Centralized disturbance detection in smart microgrids with noisy and intermittent synchrophasor data,’’ IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2775–2783, Nov. 2017.

[108] F. Dorfler and S. Grammatico, “Gather-and-broadcast frequency control ¨ in power systems,” Automatica, vol. 79, pp. 296–305, 2017.

[109] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuna, and ˜ M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.

[110] K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So, Y. C. Chu, and M. Z. Q. Chen, “Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1977–1987, Dec. 2012.

Bibliographie

Abstract: Microgrids play an important role in the electrification of rural and remote areas because they can operate in islanded mode without being dependent on the main grid, thus facilitating access to electricity for these areas.

Microgrids operating in island mode require high energy and power storage elements to ensure reliable power supply of loads due to the intermittent nature of renewable energy sources. This problem is more difficult to solve in microgrids with simple topologies in which sources and loads are connected to a single common point of connection via power lines (single-PCC microgrids). A solution to ensure a higher availability of energy, with smaller storage elements and therefore lower cost, is the implementation of microgrids with mesh structure topologies with several distributed sources of different natures connected to its different connection points (multi-PCC microgrids). One of the challenges for mesh microgrids is to synchronize and connect all the distributed generators while ensuring "plug and play" functionality and respecting the active and reactive power sharing between the different distributed generation units. The most widely used methods to achieve DG active and reactive power sharing are applied at the primary level of microgrid control and are designed based on "Droop control" approaches. However, most of these methods are only effective in single-PCC microgrids and not in multi-PCC mesh microgrids. Another problem is that using Droop control-based methods to control microgrids at the primary level can cause the microgrid voltage and frequency to deviate from their nominal values, affecting the power quality and proper operation of the microgrid.

The thesis is divided into three parts. The first part presents the concept of microgrids and a review of the literature on their control strategies. In the second part, we propose a new nonlinear droop control strategy for distributed generators of mesh microgrids, whether they operate in islanded or grid-connected modes. This strategy ensures the secure synchronization of the distributed sources and the accurate power sharing between them. This strategy allows compensating voltage and frequency deviations of an islanded microgrid by deploying an additional secondary control for each of its generators using a single information on the voltage of a pilot node. This control method also allows a smooth transition from islanded to grid-connected mode without affecting the active and reactive power sharing of its sources during synchronization, as well as the control of active and reactive power exchanged with the main grid in grid-connected mode. The third part proposes a consensus-based distributed nonlinear Droop control for accurate sharing of active and reactive powers between distributed sources as well as for frequency and voltage restoration in reconfigurable islanded mesh microgrids. The controllers for primary and secondary controls are locally adjusted and do not require knowledge of the microgrid structure. The efficiency of the proposed controls proposed in this thesis as well as their robustness are proved by simulation using Simscape and are validated by HIL tests. Also, the stability of the systems is studied based on the developed mathematical model of two different mesh microgrids controlled by both proposed distributed controls.

Keywords: Distributed Generators, Distributed Control, Secondary control, Islanded Microgrids, Grid-connected Microgrids, Droop control, Power sharing, stability analysis, real-time hardware-in-the-loop implementation

Résumé : Les micro-réseaux jouent un rôle important dans l'électrification des zones rurales et éloignées car ils peuvent fonctionner en mode îloté sans être dépendants du réseau principal, facilitant ainsi l'accès à l'électricité pour ces zones. Les micro-réseaux fonctionnant en mode îloté nécessite des éléments de stockage à énergie stockée et à puissance importantes pour assurer la fiabilité de l'alimentation électrique des différentes charges en raison de la nature intermittente des sources d'énergie renouvelables. Ce problème est plus difficile à résoudre dans les micro-réseaux à topologies simples dans lesquels les sources et les charges sont reliées à un seul point commun de connexion par des lignes électriques (micro-réseaux mono-PCC). Une solution pour assurer une plus grande disponibilité de l'énergie, avec des éléments de stockage de taille réduite et donc à moindre coût, est la mise en place de micro-réseaux de topologies à structure maillée avec plusieurs sources distribuées de natures différentes connectées à ses différents points de connexion (micro-réseaux multi-PCC). L'un des défis à relever pour les micro-réseaux maillés est de synchroniser et de connecter tous les générateurs distribués tout en assurant la fonctionnalité "plug and play" et en respectant le partage de la puissance active et réactive entre les différentes unités de génération distribuées. Les méthodes les plus utilisées pour réaliser le partage de la puissance active et réactive des DG sont appliquées au niveau primaire du contrôle des micro-réseaux et sont conçues sur la base d'approches « Droop control ». Cependant, la plupart de ces méthodes ne sont efficaces que dans les micro-réseaux mono-PCC et non pas dans les micro-réseaux maillés multi-PCC. Un autre problème est que l'utilisation de méthodes basées sur la commande Droop pour contrôler les micro-réseaux au niveau primaire peut entraîner une déviation de la tension et de la fréquence du micro-réseau de leurs valeurs nominales, affectant la qualité de l'énergie et le bon fonctionnement du micro-réseau.

La thèse est divisée en trois parties. La première partie présente le concept des micro-réseaux et une revue de la littérature sur leurs stratégies de contrôle. Dans la deuxième partie, nous proposons une nouvelle stratégie de commande droop non linéaire des générateurs distribués des micro-réseaux maillés, qu'ils fonctionnent en modes îlotés ou connectés au réseau. Cette stratégie assure la synchronisation sécurisée des sources distribuées et le partage précis des puissances active et réactive consommées entre elles. Cette stratégie permet de compenser les déviations de la tension et de la fréquence d'un micro-réseau îloté par le déploiement d'un contrôle secondaire supplémentaire pour chacun de ses générateurs en utilisant une seule information sur la tension d'un nœud pilote. Cette méthode de contrôle permet également une transition sans à-coup du mode îloté au mode connecté au réseau sans affecter le partage de la puissance active et réactive de ses sources pendant la synchronisation, ainsi que le contrôle des puissances actives et réactives échangées avec le réseau principal en mode connecté au réseau. La troisième partie propose une commande Droop non linéaire distribuée à base de consensus pour un partage précis des puissances active et réactive consommée ainsi que pour la restauration de la fréquence et de la tension secondaires dans des micro-réseaux îlotés reconfigurables maillés. Les contrôleurs pour le réglage primaire et secondaire sont ajustés localement et ne nécessitent pas la connaissance de la structure du micro-réseau. L'efficacité des commandes proposées dans cette thèse ainsi que leur robustesse sont prouvées par simulation à l'aide de Simscape et sont validées par des tests HIL. De plus, la stabilité des systèmes est étudiée sur la base des modèles mathématiques établis pour les micro-réseaux maillés étudiés, contrôlés par les contrôles distribués proposés.

Mots clés : Générateurs distribués, contrôle distribué, contrôle secondaire, micro-réseaux îlotés, micro-réseaux connectés au réseau, contrôle Droop, partage de la puissance, analyse de stabilité, implémentation hardware-in-the-loop