

Gestion de l'Interconnexion des Microgrids et des Échanges Énergétiques

Chaimae EL FEDLAOUI¹, Serge PIERFEDERICI¹, Ehsan JAMSHIDPOUR²

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

² Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France

RESUME - a stabilité dynamique constitue un enjeu majeur pour les micro-réseaux AC autonomes, notamment lorsqu'ils sont alimentés par des générateurs distribués en mode grid-forming. Ce mode de contrôle assure la régulation de la tension et de la fréquence au point de couplage commun (PCC), même en fonctionnement îloté, mais il reste sensible aux interactions entre les générateurs et les charges non linéaires, telles que les charges à puissance constante (CPL). Cet article présente une analyse de la stabilité dynamique de ces systèmes, en s'appuyant sur un modèle linéarisé obtenu par la méthode des petits signaux et validé par des simulations numériques réalisées sous MATLAB-Simulink. Les résultats démontrent la cohérence entre les prédictions théoriques et les simulations, et mettent en évidence l'importance d'un réglage optimal des paramètres de ligne et de contrôle pour garantir la robustesse et la stabilité du micro-réseau face aux perturbations.

Mots-clés—Micro-réseau AC, Grid-forming, Stabilité dynamique, Charge CPL, Valeurs propres, Simulations Matlab.

1. INTRODUCTION

Les micro-réseaux AC se positionnent aujourd'hui comme une solution incontournable pour l'électrification des zones rurales, où l'accès au réseau principal demeure souvent limité ou inexistant. Grâce à leur capacité de fonctionnement en mode autonome, ces systèmes permettent une exploitation locale et durable des ressources énergétiques renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne [5]. Leur architecture décentralisée offre une flexibilité opérationnelle appréciable pour s'adapter aux variations de la production et de la consommation, tout en assurant une alimentation stable et de qualité. Toutefois, cette décentralisation s'accompagne de nombreux défis, notamment en ce qui concerne la stabilité du réseau, la régulation de tension et de fréquence, et le partage équitable de la puissance entre les unités de production.[6][4]

Dans le cadre du projet MGFARM, qui vise à développer des micro-réseaux intelligents pour soutenir l'agriculture moderne au Maroc, cette étude s'intéresse à la mise en œuvre de stratégies de contrôle avancées pour assurer la stabilité dynamique et la fiabilité de ces systèmes. Plus précisément, le contrôle en mode grid-forming, basé sur une architecture hiérarchique, est étudié pour son aptitude à stabiliser la tension et la fréquence du réseau en mode îloté, sans dépendre d'un réseau principal. Cette stratégie permet aux onduleurs de se comporter comme des sources de tension synchrones, assurant ainsi la régulation autonome du micro-réseau.

Cependant, le comportement global du micro-réseau peut être fortement affecté par l'interaction entre les différentes sources distribuées et les charges connectées. Chaque sous-système (source ou charge) peut présenter une stabilité individuelle satisfaisante, mais leur couplage, en présence notamment de lignes à faible impédance ou de délais de contrôle, peut introduire des effets dynamiques indésirables, voire

instables. De plus, la présence croissante de charges à puissance constante (CPL), issues notamment de convertisseurs électroniques à régulation serrée, constitue un facteur de risque majeur. Ces charges, en maintenant une puissance absorbée constante malgré les variations de tension, introduisent une résistance incrémentale négative qui peut amplifier les oscillations et nuire à la stabilité globale du micro-réseau.[1-3]

Pour évaluer ces phénomènes, l'analyse de stabilité en petits signaux est utilisée. Cette approche repose sur la linéarisation du système autour d'un point d'équilibre, permettant d'étudier la réponse du système à de faibles perturbations et de caractériser ses modes propres. Bien que cette méthode reste limitée à une analyse locale, elle constitue un outil pertinent pour étudier l'influence des paramètres physiques et dynamiques du système [2]. En particulier, cette étude s'intéresse à l'impact de la bande passante de la boucle de régulation de tension, ainsi que des éléments passifs du filtre LC (inductance et capacité), sur la stabilité du micro-réseau. L'objectif principal est d'analyser comment ces éléments influencent la robustesse de la stratégie de contrôle grid-forming, notamment en présence de charges à puissance constante (CPL), afin d'identifier les configurations les plus stables pour un fonctionnement fiable en mode îloté.[8]

2. DESCRIPTION DU SYSTEME

Le système étudié, illustré à la Fig.1, correspond à un micro-réseau AC autonome composé de deux générateurs distribués (DG1 et DG2) opérant en mode grid-forming. Ces générateurs, alimentés par des sources DC stables, sont connectés au point de couplage commun (PCC) via des onduleurs triphasés et des filtres LC. Ces derniers jouent un rôle essentiel dans la réduction des harmoniques et la stabilisation des tensions AC triphasées.

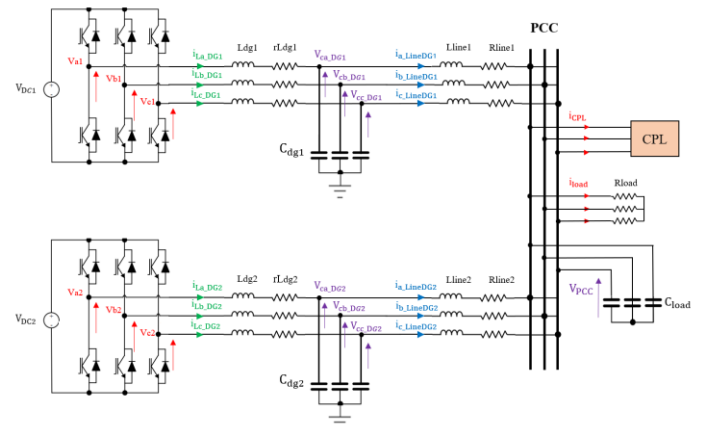


Fig.1. Système étudié

Au niveau du PCC, comme indiqué dans la Fig.1, le micro-réseau alimente deux types de charges : une charge linéaire RL et une charge non linéaire, dite à puissance constante (CPL). En

raison de sa nature à puissance constante, la charge CPL constitue un défi majeur pour la stabilité dynamique du système. Pour garantir des conditions de fonctionnement stables, les deux générateurs fonctionnent de manière coordonnée afin de maintenir une tension et une fréquence stables, en régulant simultanément la puissance active et réactive à l'aide de boucles de contrôle hiérarchisées.

Ce système met en lumière les principaux défis liés à la gestion et à la stabilité des micro-réseaux autonomes, notamment en présence de perturbations générées par des charges non linéaires.

3. STRATEGIE DE COMMANDE DU SYSTEME

Dans ce travail, les générateurs distribués (DG) du micro-réseau sont commandés en mode grid-forming, où ils définissent leurs propres références de fréquence et de tension (contrôle décentralisé). Cette approche garantit une synchronisation robuste, une répartition stable des puissances et un fonctionnement autonome en mode îloté, grâce à une architecture de contrôle primaire hiérarchisée à deux niveaux, comme illustré dans la Fig. 2 [1-3].

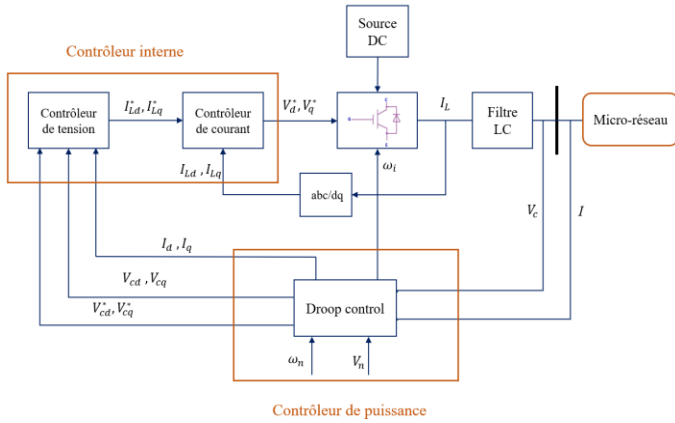


Fig.2. Architecture de contrôle hiérarchisée d'un DG en mode Grid-forming.

Les boucles externes, responsables de la régulation des puissances active et réactive, utilisent une stratégie de statisme (Droop Control) pour ajuster la fréquence ω_i et la tension V_i en fonction des variations de puissance. Inspirée de fonctionnement des générateurs synchrones, cette stratégie est définie par les relations suivantes :

$$\omega_i = \omega_n - m_i(P_i - P_{in}) \quad (1)$$

$$V_i = V_n - n_i(Q_i - Q_{in}) \quad (2)$$

où m_i et n_i représentent les coefficients de statisme, et (P_{in}, Q_{in}) les références de puissance active et réactive. Ces consignes de fréquence et de tension servent ensuite d'entrées pour les boucles internes [1], [4].

Les boucles internes régulent les courants (I_{Ld}, I_{Lq}) et les tensions (V_{cd}, V_{cq}) au niveau du filtre LC, en suivant les consignes générées par les boucles externes. Ces régulations sont réalisées dans le repère $d-q$ de chaque DG à l'aide de régulateurs proportionnels-intégraux (PI) avec des termes de découplage pour compenser les effets liés à la pulsation ω [5].

Boucle de courant : Les tensions de consigne (V_d^* et V_q^*) sont calculées à partir des équations suivantes :

$$V_d^* = K_i(I_{Ld}^* - I_{Ld}) + \frac{K_i}{T_i} \int (I_{Ld}^* - I_{Ld})dt + V_{cd} - I_{Lq}\omega L_{dg} \quad (3)$$

$$V_q^* = K_i(I_{Lq}^* - I_{Lq}) + \frac{K_i}{T_i} \int (I_{Lq}^* - I_{Lq})dt + V_{cq} - I_{Ld}\omega L_{dg} \quad (4)$$

Boucle de tension : Les courants de consigne (I_{Ld}^* et I_{Lq}^*) sont déterminés par :

$$I_{Ld}^* = K_v(V_{cd}^* - V_{cd}) + \frac{K_v}{T_v} \int (V_{cd}^* - V_{cd})dt + I_{d0} - V_{cq}\omega C_{dg} \quad (5)$$

$$I_{Lq}^* = K_v(V_{cq}^* - V_{cq}) + \frac{K_v}{T_v} \int (V_{cq}^* - V_{cq})dt + I_{q0} - V_{cd}\omega C_{dg} \quad (6)$$

Où : K_i , K_v , T_i et T_v sont les paramètres des régulateurs PI.

Cette architecture hiérarchisée garantit une réponse rapide des boucles internes, avec une priorité donnée à la boucle de courant suivie de celle de la tension. Elle assure une régulation précise des tensions et des courants au niveau local, tout en maintenant une synchronisation stable dans le micro-réseau grâce au contrôle de puissance des boucles externes [1], [4].

4. ETUDE DE STABILITE DU SYSTEME

Avant de procéder à la modélisation du micro-réseau pour l'analyse de stabilité, il est essentiel de rappeler les fondements théoriques de l'évaluation de la stabilité locale au sens de *Lyapunov*. La méthode indirecte de *Lyapunov* repose sur l'analyse des valeurs propres de la matrice Jacobienne du système, évaluée au point d'équilibre. Si toutes les parties réelles de ces valeurs propres sont strictement négatives, le système est localement asymptotiquement stable. En revanche, la présence d'au moins une partie réelle positive indique une instabilité locale. [6-7]

Cette approche, bien qu'elle ne permette d'évaluer que la stabilité locale, offre une base solide pour examiner le comportement dynamique du système linéarisé autour d'un point d'équilibre. C'est dans ce cadre que nous développons dans la suite un modèle dynamique du micro-réseau pour en étudier la stabilité.

4.1 Modélisation du système pour son étude de stabilité

En raison des interactions dynamiques entre les générateurs distribués (DG) et les charges, la stabilité des micro-réseaux peut être significativement affectée. Pour analyser la stabilité locale et la robustesse d'un micro-réseau autonome commandé par la stratégie de statisme, un modèle mathématique a été élaboré. Celui-ci s'appuie sur les représentations en espace d'état, qui décrivent précisément les différentes parties du micro-réseau : les onduleurs, les lignes et les charges. Les équations d'état sont linéarisées autour d'un point d'équilibre afin d'obtenir un modèle en petit signal, facilitant ainsi l'analyse. [6]

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les points d'équilibre du système et d'analyser la stabilité en fonction de différents paramètres opérationnels en présence d'une charge à puissance constante (CPL).

Pour l'étude du micro-réseau considéré, constitué de deux générateurs distribués (DG), les équations d'état sont formulées en utilisant un cadre de référence commun, afin d'exprimer l'ensemble des variables dans un système de coordonnées cohérent. Le référentiel $d-q$ choisi est orienté de façon à ce que son axe d soit aligné avec le premier vecteur de tension du DG1 ($\vec{V}_1$, voir la figure 2).

Ensuite, cet axe d est décalé d'un angle θ_1 par rapport à l'axe α , où θ_1 représente l'argument du vecteur de tension de DG1 ($\vec{V}_1 = V_1 e^{j\theta_1}$). Ce référentiel $d-q$ tourne ainsi à une vitesse électrique ω_1 par rapport au référentiel fixe $\alpha-\beta$. Lorsque les deux générateurs sont synchronisés et connectés au micro-réseau, leurs pulsations ω_1 et ω_2 varient de façon à assurer l'équipartition de la puissance active consommée, jusqu'à

devenir égales en régime permanent, c'est-à-dire $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{com}$.

Les équations (7 et 8) établissent ensuite la relation entre les composantes d-q des vecteurs tensions $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ des DG1 et DG2, et leurs composantes α - β .

$$\begin{pmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \end{pmatrix} = P(-\theta_1) \begin{pmatrix} E_{1\alpha} \\ E_{1\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{3} \cdot E_1 \cdot \cos \theta_1 \\ \sqrt{3} \cdot E_1 \cdot \sin \theta_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3} \cdot E_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{2d} \\ V_{2q} \end{pmatrix} = P(-\theta_2) \begin{pmatrix} E_{2\alpha} \\ E_{2\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{3} \cdot E_2 \cdot \cos \theta_2 \\ \sqrt{3} \cdot E_2 \cdot \sin \theta_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} V_{2d} \\ V_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3} \cdot E_2 \cdot \cos \xi \\ \sqrt{3} \cdot E_2 \cdot \sin \xi \end{pmatrix}$$

Avec $\xi = \theta_2 - \theta_1$ et $d\xi = \omega_2 - \omega_1$

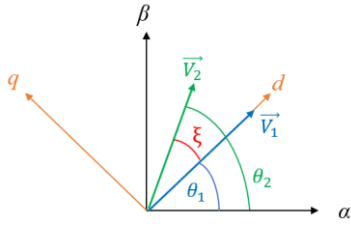


Figure 3 : Référentiels α - β et d-q.

a) Modèle du générateur distribué

À partir de ce cadre de référence, nous pouvons établir les équations d'état pour un seul générateur distribué (DG). La figure ci-dessus illustre le schéma triphasé simplifié de ce sous-système, qui comprend un onduleur, filtre LC, et une charge locale. Pour cela, nous commençons par établir les équations d'état du système représenté dans la figure 4, il vient :

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f I_d + L_f \omega_{ref} I_q + V_d - V_{cd} \quad (9)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f I_q - L_f \omega_{ref} I_d + V_q - V_{cq} \quad (10)$$

$$C_f \frac{dV_{cd}}{dt} = I_d - I_{Ld} + C_f \omega_{ref} V_{cq} \quad (11)$$

$$C_f \frac{dV_{cq}}{dt} = i_q - I_{Lq} - C_f \omega_{ref} V_{cd} \quad (12)$$

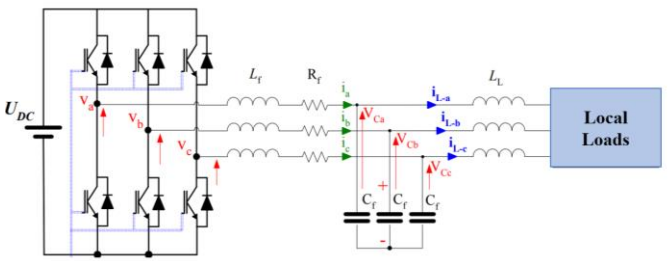


Figure 4 : Vue d'ensemble du circuit triphasé d'un seul DG et de la charge.

b) Modèle de la puissance

En mode îloté, les unités de production (DG) sont connectées au micro-réseau (MG) à l'aide de convertisseurs à source de tension fonctionnant en topologie grid-forming. Dans ce mode de fonctionnement, les consignes de tension et de fréquence sont assurées par la stratégie de statisme (Droop Control).

Les puissances instantanées active et réactive (P et Q) sont filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas du premier ordre pour obtenir les valeurs moyennes (filtrées) Pf et Qf, selon les relations (15-16). Il convient de noter que la fréquence de coupure ω_f du filtre est liée à la dynamique souhaitée pour la commande par statisme.

$$P = V_{cd} \cdot I_{Ld} + V_{cq} \cdot I_{Lq} \quad (13)$$

$$Q = V_{cq} \cdot I_{Lq} - V_{cd} \cdot I_{Ld} \quad (14)$$

$$\frac{dQ_f}{dt} = \omega_f (Q - Q_f) \quad (15)$$

$$\frac{dQ_f}{dt} = \omega_f (Q - Q_f) \quad (16)$$

Où V_{cd}, V_{cq} et I_{Ld}, I_{Lq} sont les tensions et courants mesurés dans le référentiel dq.

c) Modèle des lois de commande

En nous concentrant sur le contrôle interne du générateur distribué, qui comporte deux boucles de régulation, les équations du modèle en petit signal sont présentées ci-après. Concernant la boucle de régulation de courant, un changement de variable est effectué pour introduire deux variables d'état supplémentaires liées à l'action intégrale.

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma_d}{dt} &= (I_{Ld}^* - I_{Ld}) \\ \frac{d\gamma_q}{dt} &= (I_{Lq}^* - I_{Lq}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$V_d^* = K_i (I_{Ld}^* - I_{Ld}) + \frac{K_i}{T_i} \cdot \gamma_d + V_{cd} - I_{Lq} \omega_{ref} L_f$$

$$dV_d^* = K_i d\gamma_d + \frac{K_i}{T_i} \cdot dI_{Ld}^* - \frac{K_i}{T_i} \cdot dI_{Ld} - dI_{Lq} \omega_{ref} L_f$$

$$V_q^* = K_i (I_{Lq}^* - I_{Lq}) + \frac{K_i}{T_i} \cdot \gamma_q + V_{cq} - I_{Ld} \omega_{ref} L_f$$

$$dV_q^* = K_i d\gamma_q + \frac{K_i}{T_i} \cdot dI_{Lq}^* - \frac{K_i}{T_i} \cdot dI_{Lq} - dI_{Ld} \omega_{ref} L_f$$

De la même manière, pour la boucle de contrôle de tension, les expressions des tensions de référence en petit signal appliquées à cette régulation sont données dans l'équation (18).

$$\frac{d\sigma_d}{dt} = (V_{cd}^* - V_{cd})$$

$$\frac{d\sigma_q}{dt} = (V_{cq}^* - V_{cq})$$

$$I_d^* = K_v (V_{cd}^* - V_{cd}) + \frac{K_v}{T_v} \cdot \sigma_d + I_{Ld} - V_{cq} \omega_{ref} C_f$$

$$dI_d^* = K_v d\sigma_d + \frac{K_v}{T_v} \cdot V_{cd}^* - \frac{K_v}{T_v} \cdot V_{cd} + I_{Ld} - V_{cq} \omega_{ref} C_f$$

$$I_q^* = K_v (V_{cq}^* - V_{cq}) + \frac{K_v}{T_v} \cdot \sigma_q + I_{Lq} - V_{cd} \omega_{ref} C_f$$

$$dI_q^* = K_v d\sigma_q + \frac{K_v}{T_v} \cdot V_{cq}^* - \frac{K_v}{T_v} \cdot V_{cq} + I_{Lq} - V_{cd} \omega_{ref} C_f \quad (18)$$

d) Modèle de la ligne d'interconnexion

La ligne d'interconnexion reliant le générateur distribué au bus de charge (PCC) est modélisée par une impédance série comprenant une résistance R_{line} et une inductance L_{line} . Le modèle en petit signal de cette ligne d'interconnexion est présenté dans l'équation (19).

$$\frac{dI_{lined}}{dt} = \frac{-R_{line} I_{lined} + V_{cd} - V_{pccd} + L_{line} \omega_{ref} I_{lineq}}{L_f} \quad (19)$$

$$\frac{dI_{lineq}}{dt} = \frac{-R_{line} I_{lineq} + V_{cq} - V_{pccq} - L_{line} \omega_{ref} I_{lined}}{L_f} \quad (20)$$

Où V_{cd} , V_{cq} , I_{lined} et I_{lineq} sont les tensions et les courants au point de fonctionnement du système (voir figure 1).

e) Modélisation des charges

Afin de juger des performances des stratégies de commande en matière de stabilité locale, plusieurs types de charges ont été envisagés. Dans cette étude, nous avons porté une attention particulière à deux types de charges : une charge linéaire RL et une charge à puissance constante (CPL), cette dernière étant particulièrement exigeante pour la stabilité.

- Charge linéaire (RL) :

$$\begin{aligned} \frac{di_{Lload_d}}{dt} &= \frac{V_{pccd} - R_{load}i_{Lload_d} + L_{load}\omega_{ref}i_{Lload_q}}{L_{load}} \\ \frac{di_{Lload_q}}{dt} &= \frac{V_{pccq} - R_{load}i_{Lload_q} - L_{load}\omega_{ref}i_{Lload_d}}{L_{load}} \end{aligned} \quad (21)$$

- Charge à puissance constante (CPL) :

Pour tenir compte des propriétés de rejet de la CPL, un filtre du premier ordre (avec la pulsation de coupure ω_{cpl} est introduit. Il filtre la tension au niveau du PCC et l'utilise pour générer le courant dq de la CPL.

$$\begin{aligned} Id_{cpl} &= \frac{1}{V_{pccdf}^2 + V_{pccqf}^2} (V_{pccdf}P_{cpl} + V_{pccqf}Q_{cpl}) \\ Iq_{cpl} &= \frac{1}{V_{pccdf}^2 + V_{pccqf}^2} (-V_{pccdf}Q_{cpl} + V_{pccqf}P_{cpl}) \end{aligned} \quad (22)$$

Par la suite on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{dV_{pccd}}{dt} &= \frac{-i_{Ld} - i_{Lload_d} + i_{lined} + C_{load}\omega_{ref}V_{pccq} - Id_{cpl}}{C_{load}} \\ \frac{dV_{pccq}}{dt} &= \frac{-i_{Lq} - i_{Lload_q} + i_{lineq} - C_{load}\omega_{ref}V_{pccd} - Iq_{cpl}}{C_{load}} \\ \frac{dV_{pccdf}}{dt} &= \omega_{cpl}(V_{pccd} - V_{pccdf}) \\ \frac{dV_{pccqf}}{dt} &= \omega_{cpl}(V_{pccq} - V_{pccqf}) \end{aligned} \quad (23)$$

Avec V_{pccd} et V_{pccq} sont respectivement les tensions « d » et « q » au niveau du bus de charges.

Le modèle global du micro-réseau présenté dans la Figure 1, y compris les commandes de ses DGs, défini par les équations précédentes, possède 29 variables d'état qui constituent les éléments du vecteur d'état x , décrit dans la suite.

$$X = [I_{Ld_DG1}, I_{Lq_DG1}, V_{cd_DG1}, V_{cd_DG1}, I_{Ld_DG2}, I_{Lq_DG2}, V_{cd_DG2}, V_{cd_DG2}, I_{lined_DG1}, I_{lineq_DG1}, I_{lined_DG2}, I_{lineq_DG2}, V_{pccd}, V_{pccq}, \gamma_{d_DG1}, \gamma_{q_DG1}, \gamma_{d_DG2}, \gamma_{q_DG2}, \sigma_{d_DG1}, \sigma_{q_DG1}, \sigma_{d_DG2}, \sigma_{q_DG2}, \xi, P_{f_DG1}, P_{f_DG2}, Q_{f_DG1}, Q_{f_DG2}, V_{pccd}, V_{pccq}] \quad (24)$$

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

$$\dot{X} = f(X) \text{ Avec } f: R^n \rightarrow R, n = 29 \quad (25)$$

Pour analyser la stabilité locale autour des points d'équilibre, une matrice Jacobienne est construite à partir des équations d'état. La matrice Jacobienne est définie par les dérivées partielles des équations d'état par rapport aux variables d'état :

$$A = \left(\frac{\partial f(X)}{\partial X} \right)_{X_0}$$

Où X est le vecteur des variables d'état et $f(X)$ représente les équations d'état. X_0 est la valeur des variables d'état au point d'équilibre.[6]

Une fois la matrice Jacobienne obtenue, l'analyse de stabilité est conduite en étudiant ses valeurs propres, permettant ainsi de déterminer la stabilité locale du système autour de ses points d'équilibre. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la section ci-après.

4.2 Analyse des trajectoires des valeurs propres et de leur sensibilité en fonction des variations de paramètres.

Cette partie présente l'analyse de sensibilité des paramètres clés du système, afin d'évaluer leur impact sur la stabilité locale du micro-réseau. Les simulations ont été réalisées sous MATLAB-Simulink en utilisant le modèle linéarisé développé précédemment. Cette analyse a permis de trouver les paramètres qui influencent les différentes valeurs propres, les paramètres des différents constituants du micro-réseau, y compris ses paramètres de contrôle.

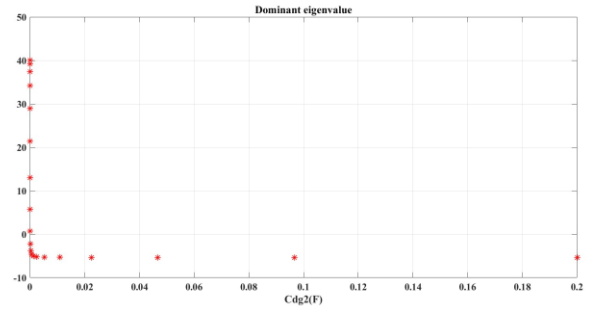


Figure 5 : Évolution de la valeur propre dominante en fonction de la capacité du filtre de sortie C_{dg2}

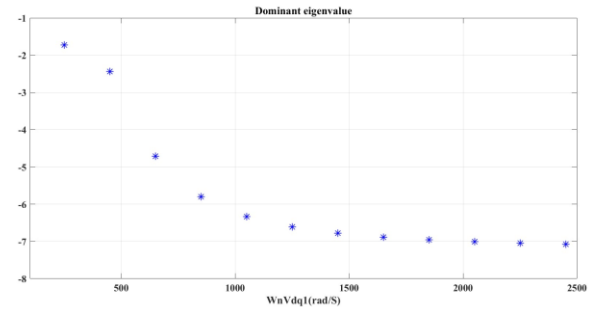


Figure 6 : Influence de la bande passante du régulateur de tension ω_{nVdq} sur la stabilité du système

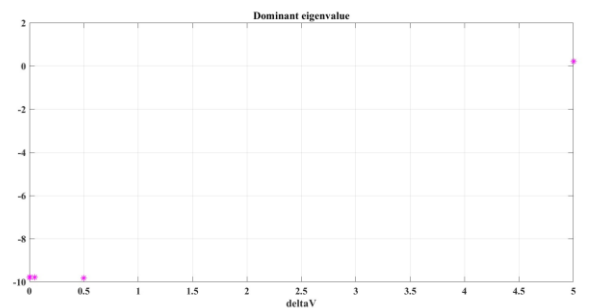


Figure 7 : Influence de la variation de δV sur la valeur propre dominante

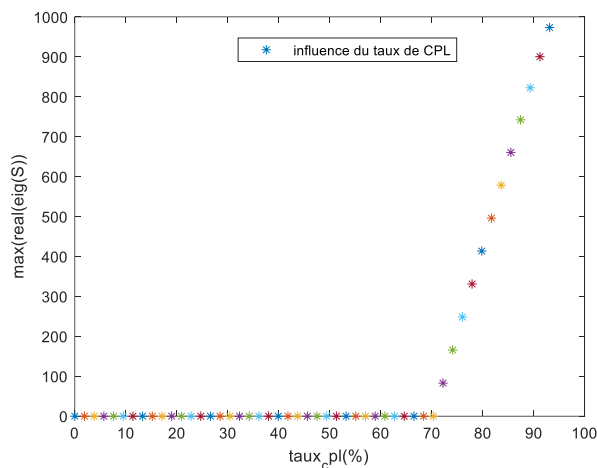


Figure 8 : Influence du taux de la charge à puissance constante (CPL) sur la stabilité du système

4.3 Interprétation des résultats de simulation

Les résultats des simulations, illustrés par les figures [5 à 8] apportent un éclairage approfondi sur l'influence des paramètres clés du micro-réseau sur sa stabilité locale. Dans un premier temps, la figure (5) met en évidence l'impact de la capacité du filtre de sortie C_{dg2} sur la dynamique du système. Il apparaît clairement qu'une augmentation de C_{dg2} entraîne un déplacement des valeurs propres dominantes vers la partie gauche du plan complexe, traduisant une amélioration de l'amortissement et, par conséquent, une stabilité locale renforcée. À l'inverse, lorsque C_{dg2} est trop faible, le système devient moins amorti et plus vulnérable aux perturbations dynamiques, ce qui met en évidence l'importance d'un dimensionnement optimal de ce filtre.

La figure (6) illustre l'influence de la bande passante du régulateur de tension $\omega_{nv dq1}$. Les résultats obtenus démontrent que l'élargissement de cette bande passante déplace les valeurs propres dominantes plus loin de l'axe imaginaire. Cette tendance indique un accroissement de la rapidité de la réponse dynamique, confirmant que la performance du régulateur de tension est un levier puissant pour améliorer la robustesse du micro-réseau. Cependant, un choix excessif de bande passante pourrait conduire à des interactions non désirées avec d'autres boucles de contrôle, ce qui justifie l'importance d'un compromis soigneux.

La figure (7) apporte un éclairage complémentaire sur la sensibilité de la stabilité à la pente de la loi de droop de tension δV . Les valeurs propres dominantes se rapprochent de l'axe imaginaire lorsque δV est augmenté, ce qui signale une dégradation progressive de la stabilité. Cette observation met en lumière la nécessité de calibrer δV de façon judicieuse : un coefficient de droop trop faible peut nuire au partage équitable de la puissance réactive, tandis qu'un coefficient trop élevé menace directement la stabilité dynamique.

Enfin, la figure (8) montre l'effet critique du taux de charge à puissance constante (CPL). Les résultats révèlent qu'au-delà d'un certain seuil de CPL, les valeurs propres dominantes augmentent fortement, marquant la perte de robustesse de la stabilité locale. Cette constatation est particulièrement importante pour les applications pratiques, car les CPL constituent souvent une part croissante des charges modernes (électronique de puissance, convertisseurs, etc.). Il est donc

primordial de bien connaître cette limite critique pour garantir le fonctionnement sûr du micro-réseau.

En conclusion, l'ensemble de ces analyses démontre la complexité et l'interdépendance des facteurs influençant la stabilité du micro-réseau. Elles soulignent la nécessité d'une approche globale et méthodique pour le dimensionnement et le réglage des paramètres (capacité de filtrage, bande passante de régulation, droop de tension, taux de CPL), afin de concilier performance dynamique et robustesse de la stabilité locale. Ces résultats constituent ainsi un socle essentiel pour orienter les choix d'optimisation et de conception future des micro-réseaux AC.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer la stabilité dynamique d'un micro-réseau AC en mode grid-forming, en mettant particulièrement l'accent sur les paramètres critiques influençant la stabilité locale. Les résultats de simulation ont mis en lumière quatre points essentiels :

- L'augmentation de la pulsation du régulateur de tension ($\omega_{nv dq1}$) améliore l'amortissement des modes critiques, renforçant la stabilité locale du système.
- La capacité de filtrage en sortie d'onduleur joue un rôle déterminant : des valeurs suffisamment élevées stabilisent le système même en présence de faibles bandes passantes, mais au prix de contraintes techniques et économiques.
- Le coefficient de la loi de droop de tension (δV) doit être calibrée avec soin pour éviter toute dégradation de la stabilité dynamique.
- Enfin, la charge à puissance constante (CPL) exerce un impact majeur : une part importante de CPL dans la charge globale tend à déstabiliser le système, en particulier lorsque la puissance fournie est élevée.

Ces enseignements soulignent la nécessité d'un dimensionnement optimal et d'un réglage fin des paramètres de régulation pour garantir la robustesse et la stabilité locale du micro-réseau.

Actuellement, nous poursuivons ce travail par une analyse de stabilité globale afin d'évaluer la résilience du système face à de grandes perturbations et de valider son comportement sur l'ensemble des états accessibles. En parallèle, nous explorons l'implémentation d'une commande avancée qu'une stratégie à boucle unique basée sur la platitude ou la passivité, visant à concilier rapidité de réponse et stabilité globale renforcée. Ces perspectives permettront d'optimiser les performances dynamiques et de valider les solutions proposées dans des conditions expérimentales, ouvrant ainsi la voie à une gestion plus fiable et plus efficace des micro-réseaux AC.

6. REMERCIEMENTS

Le projet MGFARM a bénéficié d'un financement de l'Union européenne dans le cadre du programme de recherche Horizon 2020 portant la référence de l'accord de subvention n°963530.

7. REFERENCES

- [1] Y. Hennane, A. Berdai, J.-P. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, "New Decentralized Control of Mesh AC Microgrids: Study, Stability and Robustness Analysis," *Sustainability* 2021, 13, 2243., <https://doi.org/10.3390/su13042243>.
- [2] Y. Ma, L. Fu, Q. Hu, G. Wang, C. Liu, "Transient Synchronizing Stability of Droop-Controlled Converter during Grid Fault Considering Current Saturation Limitation", *Processes* 2022, 10, 1578. <https://doi.org/10.3390/pr10081578>.
- [3] W. R. Issa, M. A. Abusara and S. M. Sharkh, "Impedance interaction between islanded parallel voltage source inverters and the distribution network," *7th IET International Conference on Power Electronics*,

Machines and Drives (PEMD 2014), Manchester, UK, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0315.

- [4] S. Ouoba, A. Houari, and M. Machmoum, "A Distributed Secondary Control for Autonomous AC Microgrid Based on Photovoltaic and Energy Storage Systems," *ELECTRIMACS 2022*, June 2023, doi: 10.1007/978-3-031-24837-5_23.
- [5] S. F. Zarei, M. A. Ghasemi, S. Peyghami and F. Blaabjerg, "A Fault Detection Scheme for Islanded-Microgrid with Grid-Forming Inverters," *2021 6th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)*, New Orleans, LA, USA, 2021, pp. 01-06, doi: 10.1109/eGRID52793.2021.9662140.
- [6] Abdellatif Elmouatamid , Radouane Ouladsine , Mohamed Bakhouya, Najib El Kamoun, Mohammed Khaidar and Khalid Zine-Dine . Review of Control and Energy Management Approaches in Micro-Grid Systems. MDPI,2020.
- [7] Khefifi, N. (2021). *Élaboration de stratégies de contrôle-commande basées sur la passivité pour le pilotage d'un micro-réseau de génération décentralisée de type AC en mode autonome* (Thèse de doctorat, Université de Nantes, France). Institut de Recherche en Energie Electrique Nantes Atlantique (IREENA).
- [8] L. Meng, Q. Shafiee, G. F. Trecate, H. Karimi, D. Fulwani, X. Lu, and J. M. Guerrero. Review on control of dc microgrids and multiple microgrid clusters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Sep. 2017.
- [9] Sifeddine BENAHMED, Phd research on Distributed Cooperative Control for DC Microgrids, Université de Lorraine,2020.
- [10] Banerji, D. Sen, A. K. Bera, D. Ray, D. Paul, A. Bhakat, and S. K. Biswas. Microgrid: A review. In 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS), Aug 2013
- [11] Ritu Raj Shrivastwa, Ahmad Hably, Kaouthar Melizi, Seddik Bacha. Understanding Microgrids and Their Future Trends. ICIT 2019 - IEEE International Conference on Industrial Technology, Feb 2019, Melbourne, Australia