

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Études
De MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : **Machines Electriques**
Présenté par

Dalia BENTALEB
Yasmina BEN ABDELOUAHAB

Thème

**Analyse des Performances de Techniques de
Synchronisation de Sources d'Énergie Renouvelable
à un Réseau Déséquilibré**

Mémoire soutenu publiquement le 01/07/2024 devant le jury composé de :

M Koussaila MESBAH
MCA, UMMTO, Président

M Boussad BOUKAIS
MCB, UMMTO, Encadrant

M Adel RAHOUI
MCA, ENSTP, Examineur

Remerciements

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Commande Des Actionneurs Electriques, de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude en premier lieu à Monsieur Boussad BOUKAIS, MCB à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Directeur de notre mémoire de Master pour sa bienveillance, son encouragement constant et ses précieux conseils ont été des piliers essentiels dans l'élaboration de ce mémoire à deux mains.

Nous tenons à remercier chaleureusement à Monsieur Koussaila MESBAH, MCA à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour son soutien, sa patience, sa disponibilité et son expertise ont été d'une aide inestimable tout au long de notre recherche.

Un grand merci à Monsieur Adel RAHOUI, MCA à l'ENSTP d'Alger, pour sa rigueur intellectuelle, son expertise pointue et son accompagnement attentif. Ses remarques pertinentes ont grandement contribué à la qualité de notre travail en binôme.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements envers Madame Fatma-Zohra Hacid, responsable du laboratoire pour son accueil bienveillant et sa disponibilité permanente. Nous lui sommes profondément reconnaissantes pour avoir créé des conditions de travail optimales dans un environnement propice à l'épanouissement.

Enfin, nous sommes reconnaissantes envers Mademoiselle AMOURA et Monsieur ASNOUNE pour leurs explications claires et leurs éclaircissements qui ont grandement enrichi notre compréhension, cela a été d'un grand apport pour la réalisation de notre projet.

Sommaire

Remerciement

Dédicace 1

Dédicace 2

Listes des figures

Listes des abréviations

	Introduction générale	1
I.1	Introduction	3
I.2	Connexion des sources d'énergie au réseau électrique	3
I.3	Classification des techniques de synchronisation.....	4
I.4	Boucles à verrouillage de phase	4
I.5	Définition du réseau électrique.....	5
I.6	Réseau électrique idéal	5
I.7	Perturbations des réseaux	6
I.7.1	Chute de tension et déséquilibre.....	6
I.7.2	Déviation de fréquence.....	8
I.7.3	Perturbation harmonique	9
I.7.4	saut de phase.....	10
I.8	Conclusion	12
Chapitre II. Boucle à verrouillage de phase (PLL classique)		
II.1	Introduction	13
II.2	Définition et domaine d'utilisation.....	13
II.3	Structure générale de la PLL	13
II.4	Fonctionnement de PLL classique.....	15
II.5	Modélisation de la PLL	15
II.5.1	Fonction de transfert du système au départ	15
II.5.2	Fonctions de transfert en boucle ouverte puis en boucle fermée.....	16
II.6	Simulation dans l'environnement Matlab Simulink	18

II.6.1 Test de la PLL classique sur un réseau idéal	18
II.6.2. Chute de tension de type A.....	18
II.6.3. Chute de tension de type B.....	19
II.6.4. Chute de tension de type C.....	19
II.6.5. Déviation de fréquence.....	20
II.6.6. Présence d'harmoniques.....	21
II.6.7 Présence d'un saut de phase	23
II.7 Discussion des résultats	24
II.8. Conclusion	25
Chapitre III :PLL basé sur la théorie des sigaux retardés	
III.1 Introduction	26
III.2 Les composantes symétriques instantanées	26
III.3 Simulation et analyse du comportement de PLL basée sur la théorie des signaux retardés	29
III.3.1 Réseau idéal.....	29
III.3.2 Chute symétrique de tension triphasée.....	30
III.3.3 Chute monophasée	31
III.3.4 Chute biphasée	33
III.3.5 Déviation de fréquence.....	34
III.3.6 Présence d'harmoniques	35
III.3.7 Présence d'un Saut de phase	37
III.4 Discussion des résultats	38
III.5 Conclusion	39
Chapitre IV: PLL basé sur un intégrateur généralisé du seconde ordre	
IV.1 Introduction	40
IV.2 Définition.....	40
IV.3 Structure générale du SOGI.....	40
IV.4 Principe de fonctionnement	41
IV.5 Modélisation du SOGI-PLL	42
IV.5.1. Fonctions de transfert du SOGI-PLL.....	42

IV.5.2.	Choix du gain du SOGI	42
IV.6	Implémentation du SOGI-PLL dans un réseau triphasé	42
IV.7	Simulation et analyse le comportement du SOGI_PLL	43
IV.7.1.	Réseau idéal	43
IV.7.2.	Chute symétrique triphasée.....	44
IV.7.3.	Chute monophasée.....	45
IV.7.4.	Chute biphasée.....	46
IV.7.5.	Déviatiion de fréquence	47
IV.7.6.	Présence d'harmoniques.....	49
IV.8	Discussion des résultats	51
IV.9	Conclusion	53
	Conclusion générale	55
	Référence.....	56

Dédicace 1

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs, Wardia et Karima pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères, Larbi et Mouloud pour leur appui et leur encouragement.

A mon cher fiancé Ferhat pour son sacrifice, merci d'être toujours à mes coté jusqu'à la fin.

A toutes mes amies, Kenza, Kamilia et Thiziri plus particulièrement, Mélissa, Siham, Sarah, Lydia et Imane et toute la promo de Machine Electrique pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Dédicace 2

Je dédie ce travail de fin d'études aux personnes les plus chères à mon cœur :

À **ma grand-mère**, source de sagesse et de tendresse, dont l'amour inconditionnel et le soutien sans faille m'ont porté tout au long de ce parcours, merci pour tout ce que tu as fait et continue de faire pour moi.

À **ma tante**, pour son soutien moral et émotionnel, ses conseils avisés, son encouragement constant. Ton dévouement et ta patience m'ont permis de surmonter les défis et de persévérer. Merci d'avoir été là pour moi à chaque instant.

À **mon oncle**, que nulle dédicace puisse exprimer ce que je lui dois. Merci pour ta patience, tes efforts, ta générosité, qui ont été des sources inestimables de forces et de motivation.

À **mes très chères cousins Salem et Aylan**, je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de joie et de réussite.

À **mes parents**, je dis merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À **ma binôme**, alliée précieuse de cette aventure académique.

À **mes amies Lynda, Samia, Lydia, Lila** rayons de soleil dans les moments sombres. Votre présence chaleureuse, vos encouragements soutenus et votre amitié indéfectible constitue des trésors inestimables.

Dalia BENTALEB

Listes D'abréviations

PLL :	Boucle à verrouillage de phase (Phased Locked Loop)
FLL :	Boucle à verrouillage de fréquence (Frequency Locked Loop)
CLS :	Synchronisation à boucle fermée (Closed loop synchronization)
BS :	Synchronisation Par Diffusion (Broadcast synchronization)
OLS :	Synchronisation à boucle ouverte (Open Loop Synchronization)
VCO :	Oscillateur Commandé en Tension (Voltage Controlled Oscillator)
AC :	Courant Alternatif (Alternating Current)
DP :	Détecteur de phase (Phase Detector)
FTBF :	Fonction de transfert en boucle fermée
FTBO :	Fonction de transfert en boucle ouverte
PI :	Proportionnel Intégral (Proportional Integral)
SOGI :	Intégrateurs Généralisés du Second Ordre (Second Order Generalized Integrator)
QSG :	Générateur de Signal en Quadrature (Quadrature Signal Genera

Introduction générale

Introduction générale

L'importance croissante des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial impose de nouveaux défis pour la gestion et la synchronisation des réseaux électriques. Les sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien et l'hydroélectricité doivent être efficacement intégrées dans les réseaux électriques pour assurer une fourniture d'énergie stable et fiable. Ce mémoire se concentre sur la synchronisation de ces sources d'énergie renouvelable avec le réseau électrique, en mettant en avant des techniques et des outils de simulation avancés pour analyser et résoudre les problèmes associés.

Ce travail est structuré de quatre chapitres, chacun abordant des aspects spécifiques de la synchronisation des réseaux électriques.

Le premier chapitre présente une introduction aux réseaux électriques et aux différentes techniques de synchronisation utilisées pour intégrer les sources d'énergie renouvelable. Nous avons effectué plusieurs essais et simulations sur MATLAB Simulink pour analyser les comportements des réseaux électriques en présence de perturbations et de différents types de défauts qui peuvent apparaître sur les réseaux électriques, ainsi que leurs impacts, ils sont également définis et étudiés.

Le deuxième chapitre se concentre sur la boucle à verrouillage de phase (PLL), une technique essentielle pour la synchronisation des réseaux électriques. Nous y définissons la PLL classique, décrivons sa structure générale et son domaine d'utilisation, et expliquons son fonctionnement détaillé. La modélisation de la PLL a été réalisée et des simulations ont été effectuées pour tester son comportement en présence de divers défauts sur le réseau.

Dans le troisième chapitre, nous abordons une méthode avancée de synchronisation utilisant une PLL basée sur la théorie des signaux retardés. Cette approche fait usage des composantes symétriques instantanées pour améliorer la précision et la robustesse de la synchronisation. Nous avons réalisé des simulations sur MATLAB Simulink en imposant différents défauts pour évaluer les performances de cette méthode et discuté des résultats obtenus.

Le dernier chapitre traite de la PLL basée sur un intégrateur généralisé du deuxième ordre (SOGI-PLL). Nous y définissons le SOGI-PLL, décrivons sa structure générale et expliquons son principe de fonctionnement. La modélisation et les simulations sur MATLAB Simulink ont permis d'examiner l'efficacité de cette technique dans divers cas de défauts et de perturbations sur le réseau électrique.

L'ensemble de ce mémoire vise à offrir une compréhension approfondie des méthodes de synchronisation des sources d'énergie renouvelable avec les réseaux électriques, en mettant en lumière les défis rencontrés et les solutions potentielles grâce à des simulations et des analyses détaillées.

Chapitre I

Réseau électrique et

introduction aux techniques

de synchronisation

I.1 Introduction

Le réseau électrique fournit aux clients une tension et une fréquence conformes aux normes, ces grandeurs subissent des perturbations qui sont causées par les harmoniques, le déséquilibre de phases, la chute des tensions et la déviation de fréquence. [1]. [2].

Dans cette section, nous avons étudié les principes fondamentaux du réseau électrique dans le cas idéal puis dans le cas de perturbations, les résultats de simulation sur Matlab se trouvent à la fin de ce chapitre.

I.2 Connexion des sources d'énergie au réseau électrique

La connexion d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique peut se faire à basse tension (230/400V), moyenne tension (généralement 15kV ou 20kV) ou haute tension (132kV). Dans notre étude on a choisi la basse Tension.

Pour répondre aux besoins de différentes sources d'énergie telles que l'éolienne et le photovoltaïque, diverses technologies de conversion sont employées. La sortie demeure uniforme, caractérisée par un convertisseur de tension entièrement commandé fonctionnant en tant qu'onduleur/redresseur. Ce dispositif assure l'injection ou l'absorption de courant sinusoïdal dans le réseau électrique. Il se connecte à la source d'énergie via un bus de tension continue V_{dc} [3].

La technologie des convertisseurs de puissance facilite une interconnexion flexible entre les sources de production d'énergie renouvelable et le réseau électrique [3].

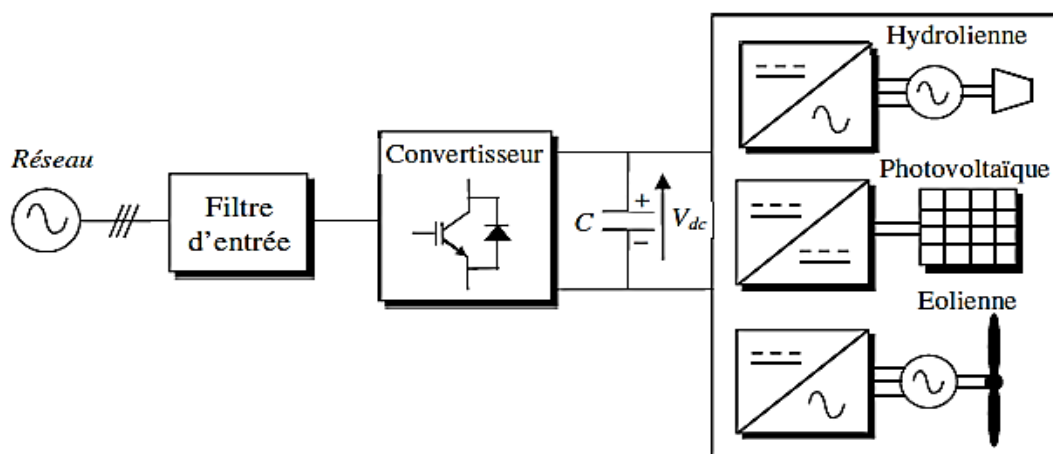


Figure I.1. Raccordement des sources d'énergies renouvelables au réseau [3].

I.3 Classification des techniques de synchronisation

Les techniques de synchronisation dans les convertisseurs de puissance se répartissent globalement en approches en boucle ouverte et en boucle fermée. Les méthodes de synchronisation en boucle ouverte (OLS) tel que la méthode rudimentaire de synchronisation manuelle et celle basée sur le synchroscope, celles-ci ne nécessitent aucun signal de rétroaction.

Les méthodes de synchronisation en boucle fermée (CLS) impliquent la rétroaction d'un ou plusieurs signaux. Parmi ces approches, on trouve principalement les boucles à verrouillage de fréquence (FLL) et les boucles à verrouillage de phase (PLL).

Les PLL ajustent l'angle de phase par rétroaction, tandis que les FLL sont conçues pour verrouiller la fréquence dans un cadre de référence stationnaire, avec une estimation de la phase effectuée en dehors de la boucle de contrôle. Les PLL et les FLL fonctionnent de manière similaire, bien qu'ils opèrent dans des cadres de référence différents. En revanche, les méthodes de synchronisation à boucle ouverte (OLS) ne nécessitent aucun signal de rétroaction. Le diagramme de la Fig. (I.2) illustre cette classification [4] - [5].

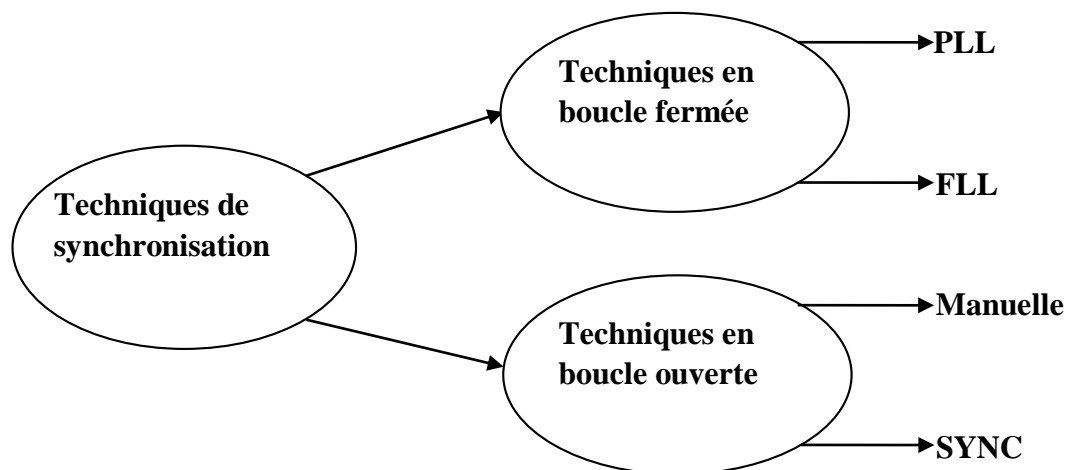


Figure I.2: Classification des techniques de synchronisation.

I.4 Boucles à verrouillage de phase

Les boucles à verrouillage de phase, communément désignées par l'acronyme anglais PLL (Phase Locked Loop), sont des dispositifs largement utilisés en électronique pour diverses applications telles que la génération de signaux et les télécommunications. Une boucle à verrouillage de phase typique se compose d'un comparateur de phase, d'un filtre de boucle, d'un oscillateur commandé en tension (VCO), et éventuellement d'un diviseur de fréquence. Ces boucles permettent de verrouiller la phase d'un signal périodique sur celle d'un autre signal,

assurant ainsi une synchronisation précise. La stabilité de ces boucles peut être évaluée par des paramètres tels que le facteur d'amortissement et la marge de phase. De plus, la réduction du bruit est essentielle, et des filtres spécifiques sont utilisés pour maintenir la stabilité du système [6].

Il existe divers types de PLL, allant de la PLL classique aux versions les plus avancées. Chacune d'elles élimine un type spécifique de perturbations pouvant survenir sur le réseau électrique.

I.5 Définition du réseau électrique

Un réseau électrique est un système complexe de composants interconnectés conçu pour générer, transmettre et distribuer de l'électricité. Il constitue l'infrastructure essentielle qui alimente nos foyers, entreprises et industries en énergie électrique, permettant ainsi le fonctionnement quotidien de sociétés modernes.

I.6 Réseau électrique idéal

Un réseau électrique idéal est un modèle théorique simplifié utilisé en électrotechnique pour simplifier l'analyse des circuits électriques, les sources d'énergies (courant, tension) et les composants sont considérés comme parfaits.

Les tensions fournies par la source sont supposées être des formes d'ondes sinusoïdales et leurs modules et fréquences restent constants quel que soit la charge, le courant circulant dans le circuit est également constant et parfaitement sinusoïdale tant que la charge est constante et équilibrée.

Les conditions idéales du réseau sont : l'amplitude de tension qui est égale à $220\sqrt{2}$ (V) ; la fréquence correspond à 50(Hz).

Équation mathématique d'un réseau idéal triphasé :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

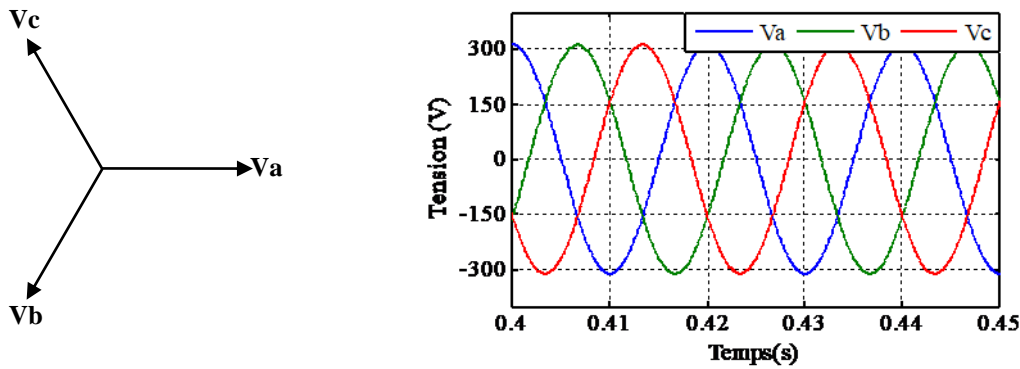


Figure I.3. Tensions de réseau triphasé idéal.

I.7 Perturbations des réseaux

Les tensions d'un réseau électrique forment un système alternatif triphasé en basse tension caractérisé par : [7]

- La fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, selon la norme du pays.
- L'amplitude des trois tensions de $220\sqrt{2}$ V.
- La forme d'onde, qui doit se rapprocher le plus possible, d'une sinusoïde [7].

Il existe plusieurs perturbations qui peuvent se produire sur un réseau électrique. Certains des plus courants sont : la chute de tension, le déséquilibre de phases (avec ses différents types), la présence d'harmoniques et les variations de fréquence et saut de phase.

Ces perturbations peuvent avoir un impact sur le bon fonctionnement du réseau électrique, la qualité de la synchronisation et la stabilité du système

I.7.1 Chute de tension et déséquilibre

Une chute de tension, également appelée baisse de tension, se produit lorsque la tension du réseau diminue brusquement. Cela peut se produire en raison de court-circuit, de défauts à la terre.

La tension peut chuter de 10% à 90% de la valeur nominale. [8]

On dit que trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré.

Le déséquilibre de phase se réfère par une différence entre les phases de tensions dans un réseau électrique. Cela peut entraîner divers problèmes, tels que la surchauffe des équipements, la dégradation de l'isolation électrique, et des dysfonctionnements des moteurs triphasés.

Ces divers facteurs peuvent contribuer à des chutes de tension dans un réseau électrique, entraînant des conséquences telles que des baisses de luminosité, des ralentissements d'appareils électriques voir leur arrêt, et des risques pour la conformité aux normes en vigueur. En cas de déséquilibre, il est essentiel pour les opérateurs du réseau électrique de détecter rapidement ces problèmes et de prendre des mesures correctives pour maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité car l'équilibrage des phases en triphasé est crucial pour éviter les risques de surtension et les dommages sur les appareils électriques, en plus un déséquilibre peut entraîner une disjonction générale.

Les figures (I.4), (I.5) et (I.6) ci-dessous illustrent respectivement : une chute de tension triphasée de 25% à $t=0,5(s)$, chute de tension monophasée de 35% à $t=0.5 (s)$, chute de tension biphasée de 40% à $t=0.5 (s)$.

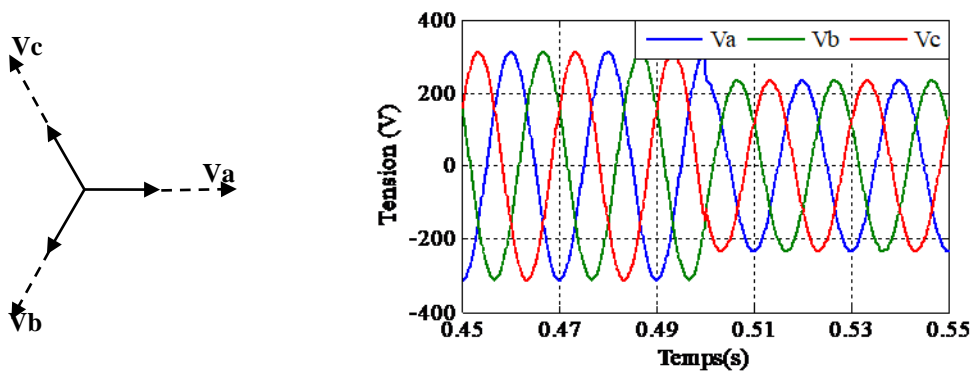


Figure I.4.Chute de type A, chute des tensions de réseau triphasé.

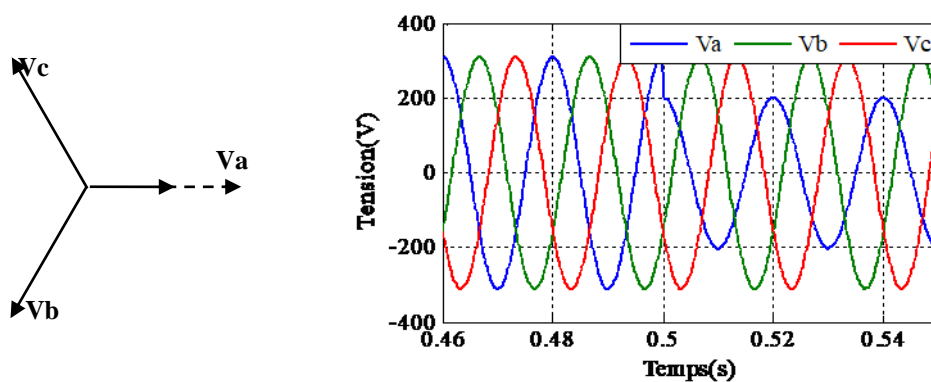


Figure I.5.Chute de type B, chute des tensions de réseau monophasé.

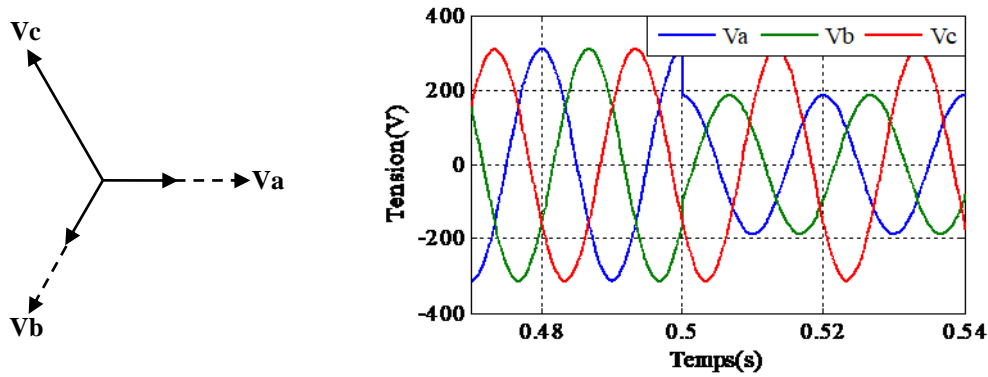


Figure I.6. Chute de type C, chute des tensions de réseau biphasé.

I.7.2 Déviation de fréquence

La fréquence dans un réseau électrique est le nombre de cycle par seconde d'une onde sinusoïdale de courant alternatif (AC). Elle est également un indicateur entre la production et la consommation d'électricité, si la consommation est inférieure à la production, la fréquence est plus élevée ; si elle est supérieure à la production, la fréquence est plus faible [8].

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Les figures (figure I.7, figure I.8), ci-dessous illustrent respectivement : une déviation de fréquence de $f=50(\text{Hz})$ à $55(\text{Hz})$ à partir de $t=0.2$ (s) et une déviation de fréquence de $f=50(\text{Hz})$ à $45(\text{Hz})$ à partir de $t=0.6$ (s).

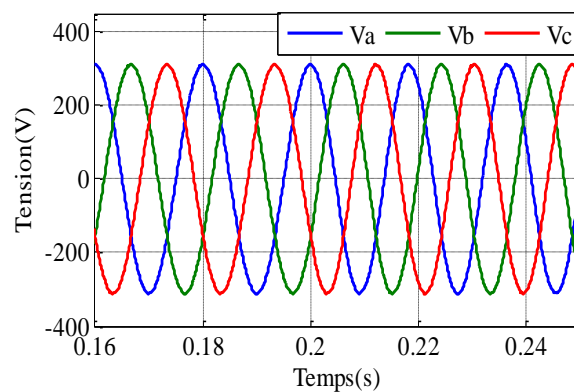


Figure I.7. Variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f= 55$ Hz.

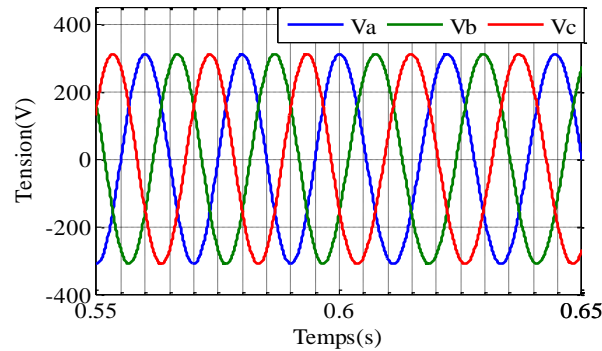


Figure I.8. Variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f=45$ Hz

I.7.3 Perturbation harmonique

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'un signal périodique, de fréquence Multiple de celle du signal fondamental [9].

Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6 et 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison d'un signal symétrique. Ils sont souvent présents dans le réseau électrique et ne sont pas généralement associées à des problèmes significatifs.

Le signal de rang 1 est la composante fondamentale du signal périodique.

L'harmonique de rang zéro correspond à la composante directe du signal. Par ailleurs l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Par contre les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. Donc, les premiers rangs harmoniques celles qui sont proches du fondamental tel que (3, 5 et 7) ont des amplitudes élevées, d'où la raison de les limiter selon les normes [10].

Les harmoniques qui dérangent le plus dans le réseau électrique sont généralement les harmoniques impairs, telles que les (5, 7, 11 et 13), car elles s'ajoutent entre elle en phase et peuvent causer des problèmes dans le réseau électrique. Cependant, d'autres harmoniques peuvent également causer des problèmes, comme les (3, 9, 15 et 21) qui sont souvent présents dans les réseaux à prédominance de charges monophasées [10].

Ces harmoniques occupant 10% de l'amplitude du fondamentale pour $n=5, 7$

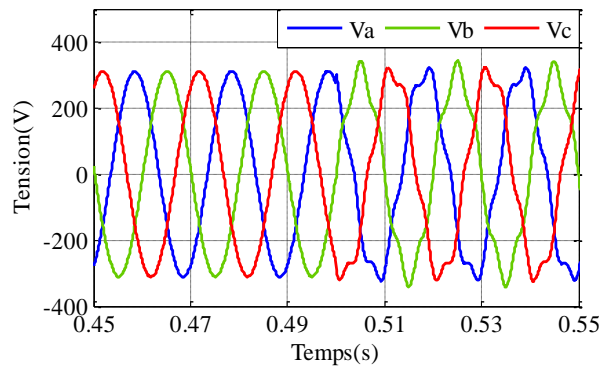


Figure I.9.Présence d'harmonique $n=5$.

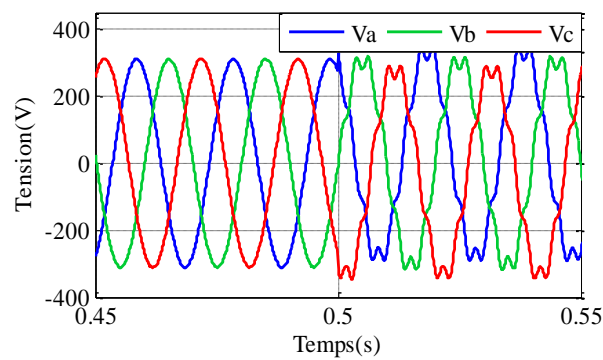


Figure I.10.Présence d'harmonique $n=7$.

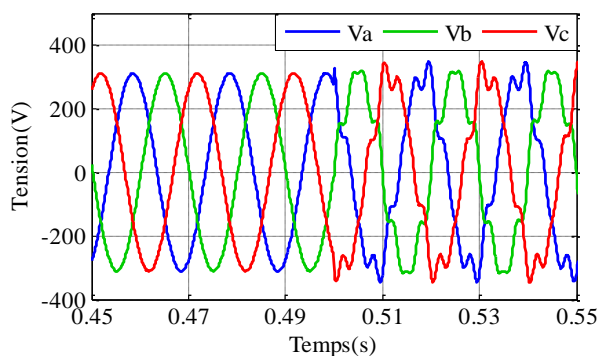


Figure I.11.Présence d'harmonique $n=5$ et $n=7$.

I.7.4 Cas de saut de phase

Un saut de phase dans le réseau électrique est une perturbation qui se produit lorsque la tension électrique varie brusquement et sans raison apparente [11]. Cela peut entraîner des problèmes de stabilité et de fonctionnement des appareils électriques connectés au réseau.

Les sauts de phase peuvent être causés par des événements tels que des défauts dans les lignes électriques, des court-circuités ou des perturbations liées aux variations de charge.

Dans le contexte des réseaux électriques, les sauts de phase sont souvent décrits en termes de variations de tension et de courant électrique. Ils peuvent être classés en deux catégories : les sauts de phase permanents, qui sont présents dans les formes d'onde de manière continue, et les sauts de phase transitoires, qui affectent les formes d'onde de manière plus ponctuelle [8].

Les systèmes de reconnaissance automatique sont utilisés pour identifier et caractériser les perturbations sur les réseaux électriques. Ces systèmes décomposent les perturbations en une succession de phases significatives, ce qui est essentiel pour l'interprétation correcte des perturbations.

La capacité de détection et d'estimation précise des phases de perturbation impacte fortement les performances du système de reconnaissance.

Les sauts de phase peuvent être réduits en utilisant des techniques de compensation ou en améliorant la robustesse des systèmes électriques aux entrées de perturbations. Par exemple, les correcteurs à avance de phase peuvent être utilisés pour augmenter le gain en basses fréquences et améliorer la précision et la rapidité du système, tout en réduisant la sensibilité aux bruits de mesure et à la déformation de la courbe de phase.

La figure présentée illustre un saut de phase que nous injectons un angle de déphasage « φ » pour les trois tensions en échelant de 0 à $\pi/2$ à l'instant $t=0,5(s)$

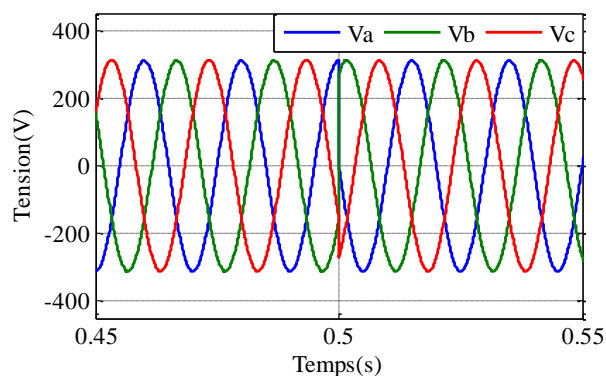


Figure I.12. Présence d'un saut de phase.

Ces perturbations électriques peuvent causer une variété de problèmes allant de simples dysfonctionnements à des pannes permanentes, mettant en danger la sécurité des personnes, des biens et des données.

I.8 Conclusion

Dans cette section nous avons abordé quelques généralités sur les techniques de synchronisation ainsi que les boucles de verrouillages de phase et les éléments qui leurs sont constitués. Ensuite nous avons défini le réseau électrique, réseau électrique idéal et avec perturbations pour terminer avec une simulation sur Matlab Simulink et une discussion des résultats obtenus, les défauts qui ont pu survenir sur le réseau posent de véritables problèmes.

Dans le prochain chapitre, nous allons aborder une autre technique de synchronisation dans le but d'éliminer ces défauts.

Chapitre II

Boucle à verrouillage de phase (PLL)

II.1 Introduction

La boucle à verrouillage de phase, que l'on désignera par la suite par l'acronyme Anglais PLL (Phase Locked Loop), est un dispositif largement utilisé dans de nombreux systèmes d'électronique pour synchroniser des signaux [9], elle permet de maintenir une cohérence temporelle entre différentes parties d'un système.

Ce chapitre sera consacré à l'étude la PLL classique et son domaine d'utilisation.

II.2 Définition et domaine d'utilisation

Les boucles à verrouillage de phase, communément désignées par l'acronyme PLL (Phased Locked Loop), représentent des dispositifs électroniques conçus pour asservir la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal externe. Leur utilisation s'étend de manière significative dans les domaines du traitement de l'information et de la transmission des données [12]. Une PLL est un système de contrôle à rétroaction non linéaire conçu pour fonctionner dans un référentiel synchrone. Elle synchronise son signal de sortie avec la composante fondamentale de la tension du réseau, qui sert de signal d'entrée [12].

Les PLL jouent un rôle essentiel au sein de divers systèmes électroniques, notamment dans :

- Les récepteurs radio, où elles contribuent à la synchronisation précise des signaux.
- Les téléphones cellulaires, où elles assurent une gestion efficace des fréquences.
- Les applications de télécommunication, telles que la restitution de porteuses, la démodulation synchrone de signaux AM, la démodulation de signaux en fréquence, et la démodulation FSK.
- Le contrôle des moteurs électriques, où elles garantissent une régulation précise.
- L'extraction de signaux enfouis dans un environnement bruyant.
- La reconstitution d'horloge lors de la transmission de données, parmi d'autres applications variées [12].

II.3 Structure générale de la PLL

Pour intégrer des sources d'énergie renouvelable au réseau électrique, il est nécessaire d'harmoniser la tension générée par le générateur d'énergie avec celle du réseau, en veillant à la synchronisation des phases et des fréquences, tout en surveillant les paramètres du réseau associés.

Cependant, les tensions du réseau sont généralement affectées par diverses perturbations.

II.4 Fonctionnement de PLL classique

Boucle non verrouillée :

- En l'absence de signal injecté dans la boucle, ou si la fréquence du signal injecté est en dehors de la plage de fonctionnement du VCO (oscillateur contrôlé en tension), la boucle est dite non verrouillée.
- Dans ce cas, la fréquence en sortie de la boucle est égale à la fréquence centrale du VCO ($f_s = f_e$).
- Une boucle non verrouillée n'a pas d'intérêt pratique.

Boucle verrouillée :

- Une fois que la boucle est verrouillée et accrochée, la fréquence d'entrée peut varier dans une certaine plage sans que la boucle ne décroche.
- Cette plage de fonctionnement normal de la PLL est appelée la plage de verrouillage, caractérisée par l'égalité des fréquences d'entrée (f_e) et de sortie (f_s).

Le rôle de la boucle à verrouillage de phase est de faire en sorte que les fréquences des signaux appliqués sur les deux entrées du comparateur de phase soient identiques, même si les phases de ces deux signaux peuvent être différentes [14].

II.5 Modélisation de la PLL

II.5.1 Fonction de transfert du système au départ

Lorsqu'il s'agit d'un système équilibré, la tension du système s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} V_a(\theta) = V_m \cos(\theta) \\ V_b(\theta) = V_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(\theta) = V_m \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Après l'application de la transformation de Park d'angle θ_{est} sur le système de tension triphasée du réseau d'angle conduit aux expressions suivantes pour V_d et V_q .

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta - \hat{\theta}) \\ -\sin(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

En supposant que l'angle de phase ($\Delta\theta$) très petit, l'angle de phase de la tension V_q sera égale à $(\Delta\theta)$

D'où on obtient $V_q = -V_m \sin(\Delta\theta)$ Car : $\sin(\Delta\theta) = \Delta\theta$

$$\Delta\theta = \frac{d}{dt} \theta \Rightarrow \theta_{est} = \frac{2\pi}{s} \Delta f \Rightarrow G(s) = \frac{\theta_{est}}{f_{est} - f} = \frac{-2\pi V_m}{s}$$

$$\theta_{est} = \int \Delta\theta dt$$

Donc la fonction de transfert du système propre est :

$$G(s) = \frac{-2\pi V_m}{s} \quad (\text{II.3})$$

Le système obtenu est fortement non linéaire. Pour synthétiser le correcteur, on se base sur un modèle linéarisé pour des faibles variations de la phase [8].

Pour satisfaire la condition $\theta = \theta_{est}$ (la phase instantanée réel de la tension directe égale à la phase instantanée de rotation estimée) on impose $V_q=0$, dans ce cas $V_d = V_m$.

La PLL sera verrouillée lorsque la condition sera satisfaite.

Expression de la pulsation ω_{est} :

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} = F_{lf}(s)V_q = k_p + \frac{k_i}{s} V_m (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{II.4})$$

Où $C(s)$ représente le filtre de la boucle (régulateur PI) qui est exprimé comme suit :

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (\text{II.5})$$

Alors la position angulaire θ_{est} à la sortie du VCO est : $\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega}$.

L'approximation $\sin \theta = \Delta\theta$ conduit alors au schéma fonctionnel présenté ci-dessous qui permet une synthèse aisé du correcteur placé dans cette boucle.

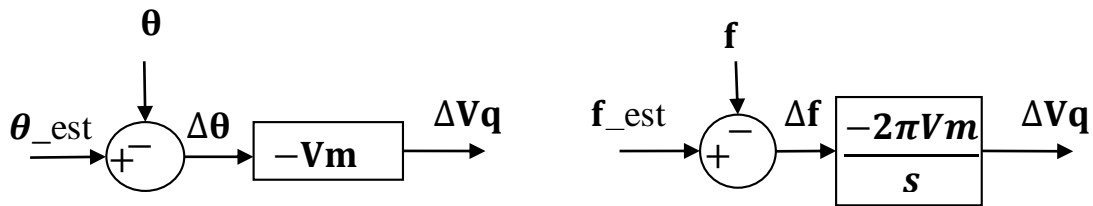


Figure II.3. Modèle linéarisé d'obtention de V_q

II.5.2 Fonctions de transfert en boucle ouverte puis en boucle fermée

La fonction de transfert d'un régulateur PI donnée avec :

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) = \frac{K_i}{s} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

Donc, la fonction de transfert en boucle ouverte avec son régulateur donné par :

$$FTBO = C(s)G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{-2\pi V_m}{s} = \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \frac{-2\pi K_i V_m}{s^2} \quad (\text{II.7})$$

Juste que celle de la boucle fermée avec un retour unitaire.

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} \quad (\text{II.8})$$

Donc :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p}{K_i}(s+1)(-2\pi V_m K_i)}{s^2 + \frac{K_p}{K_i}(s+1)(-2\pi V_m K_i)} \quad (\text{II.9})$$

La fonction de transfert en boucle fermée de la PLL s'écrit :

$$FTBF = \frac{\left(\frac{K_p}{K_i}s+1\right)}{\frac{1}{(-2\pi V_m K_i)}s^2 + \left(\frac{K_p}{K_i}\right)s+1} \quad (\text{II.10})$$

La fonction précédente a une forme d'une fonction de deuxième ordre de forme canonique :

$$FTBF = \frac{\frac{2\xi}{\omega_n}s+1}{\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n}s+1} \quad (\text{II.11})$$

Détermination des gains du régulateur PI :

ξ	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\omega_n \cdot tr$	14	10.1	7.7	5.3	5.2	3	3.4	4	4.8

Tableau II.1. Calcul des coefficients en fonction de l'amortissement [14].

En choisissant un coefficient d'amortissement à $\xi = 1$ à partir de tableau (II.1) et en choisissant un temps de réponse en boucle fermée à $tr=10$ ms. On détermine donc la valeur de la pulsation naturelle (ω_n).

$$\omega_n = \frac{4,8}{tr} \Rightarrow \omega_n = \frac{4,8}{0,01} = 480rd / s$$

On remarque que ces coefficients dépendent du choix du facteur d'amortissement (ξ) et de la pulsation naturelle (ω_n) tout en respectant le critère lié à la rapidité du système.

Par la méthode d'identification, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{-kp}{-1+i} \\ \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{1}{(-2\pi V_m)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} kp = \frac{2\xi\omega_n}{V_m} \\ ki = -\frac{\omega_n}{V_m} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

II.6 Simulation dans l'environnement Matlab Simulink

II.6.1 Test de la PLL classique sur un réseau idéal

En choisissant un amortissement $\xi = 1$ et un temps de réponse en boucle fermé ($t_r=10$ ms)

sachant que $V_m = 220\sqrt{2}$ nous obtenons :

$$K_p=3.0856 \text{ et } K_i= 740.5336$$

Les résultats de la simulation de la PLL sur un réseau triphasé équilibré sont présentés aux figures ci-dessous :

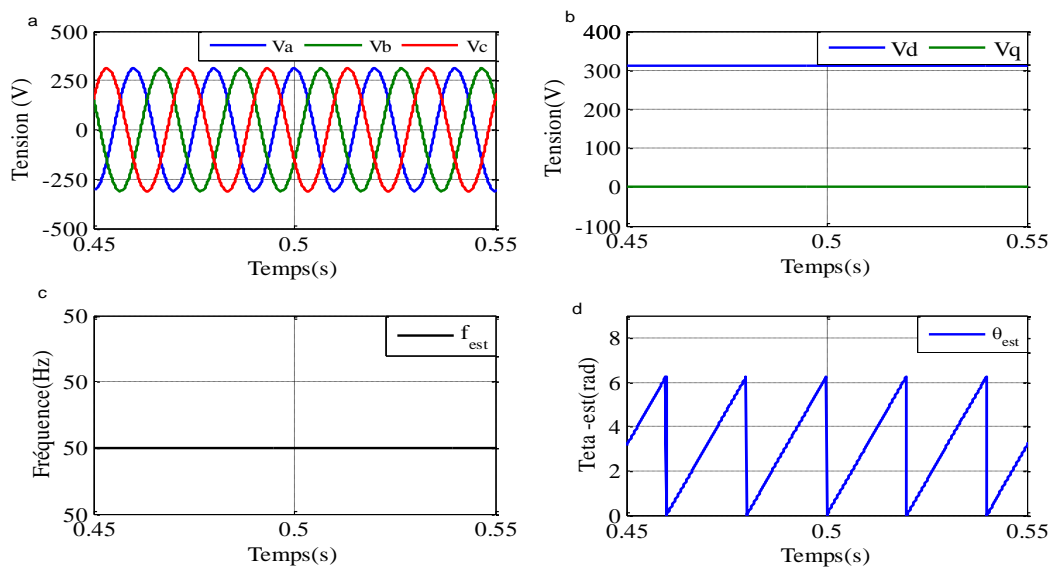


Figure.II.4 : Performance de la PLL classique pour un réseau équilibré ;(a) tension du réseau, (b)composante directe et en quadrature V_q , (c)fréquence estimée et (d)phase instantanée .

II.6.2. Chute de tension de type A

Pour évaluer les performances de la PLL classique lors d'une chute de tension triphasée, nous avons simulé une chute de 25%. Les résultats de cette simulation sont présentés dans la figure ci-dessous :

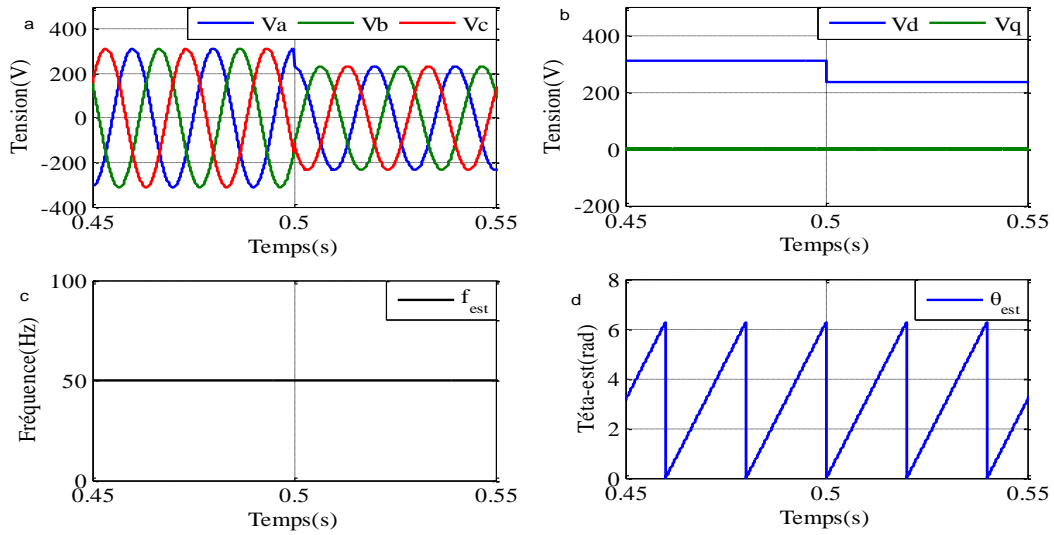


Figure II.5 : Performance de la PLL classique pour une chute triphasée ;(a) tension du réseau, (b)composante directe et en quadrature V_d et V_q , (c)fréquence estimée et (d)phase instantanée.

II.6.3. Chute de tension de type B

Lorsque le réseau subit une chute monophasée de 35% d’amplitude, les résultats de simulation sont illustrés par dans la figure ci-dessous :

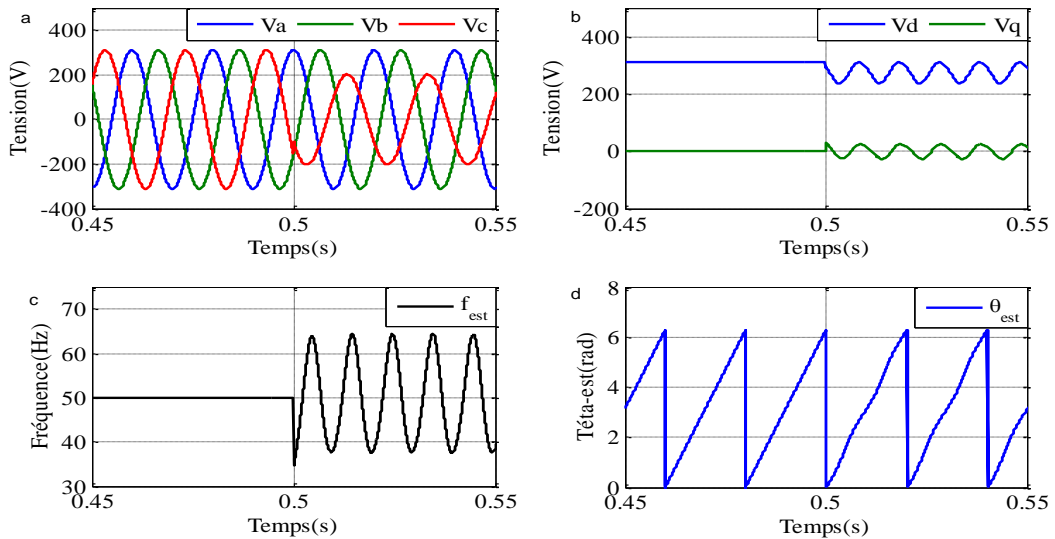


Figure II.6: Performance de la PLL classique dans le cas d’une chute monophasée ;(a) tension du réseau, (b)composante directe et en quadrature V_d et V_q , (c)fréquence estimée, (d)phase instantanée.

II.6.4. Chute de tension de type C

Lors d'une chute biphasée de 40% d'amplitude, les résultats de la simulation sont illustrés dans la figure ci-dessous :

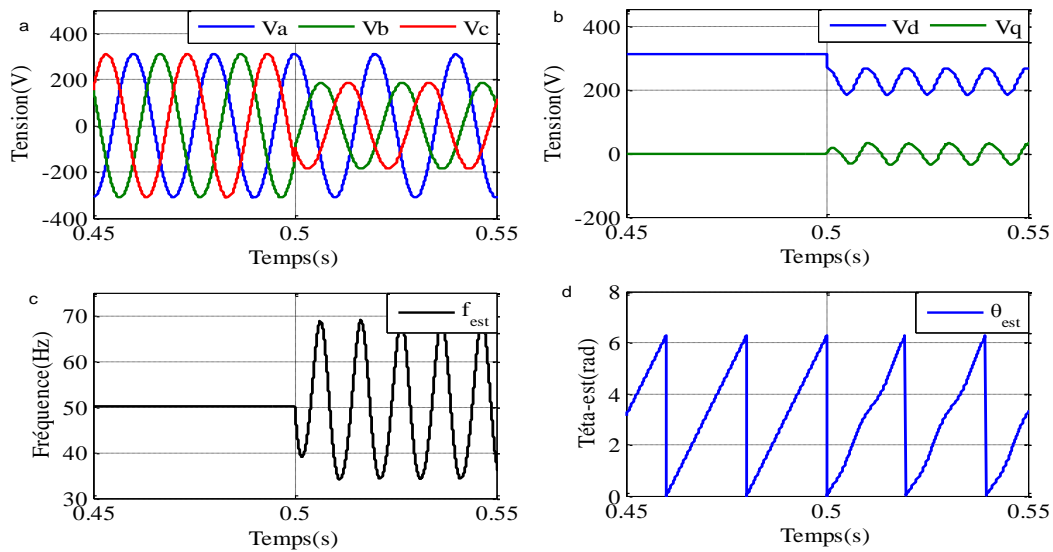


Figure II.7 : Performance de la PLL classique dans le cas d'une chute biphasée ;(a) tension du réseau, (b)composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c)fréquence estimée, (d)phase instantanée

II.6.5. Déviation de fréquence

Les figures (II.8) et (II.9) illustrent respectivement les performances de la PLL classique lors de variation de fréquence : de 50(Hz) à 55(Hz) et de 50(Hz) à 45(Hz).

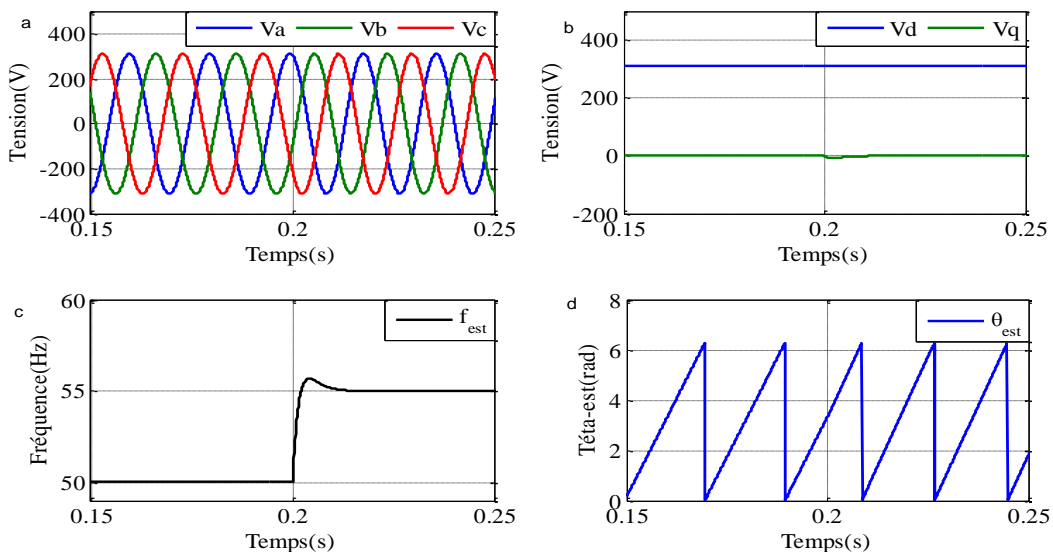


Figure II.8 : Performance de la PLL classique dans le cas d'une déviation de fréquence de 50(Hz) à 55(Hz) ;(a) tension du réseau, (b) composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c)fréquence estimée et (d) phase instantanée

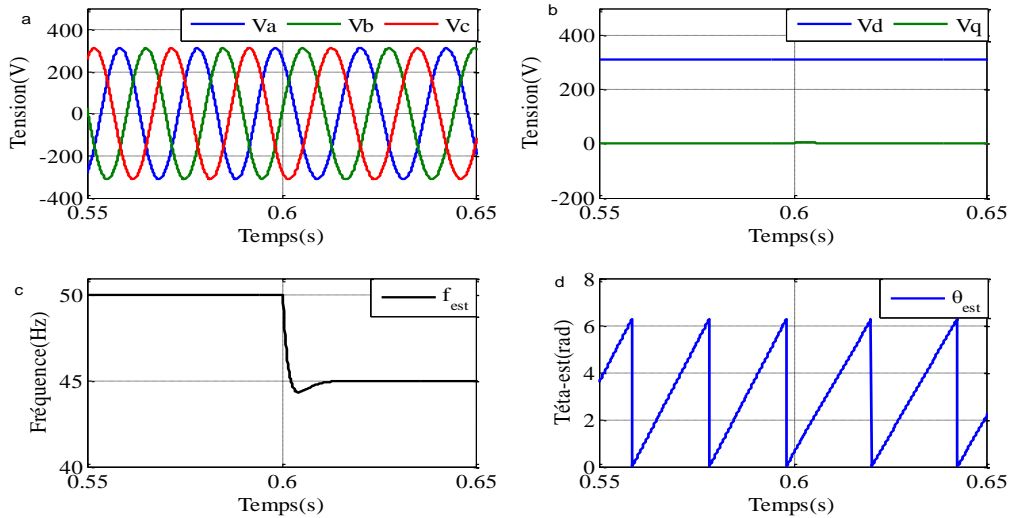


Figure II.9 : Performance de la PLL classique dans le cas d'une déviation de fréquence de 50(Hz) à 45(Hz);(a) tension du réseau, (b)composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c)fréquence estimée et (d)phase instantanée.

II.6.6. Présence d'harmoniques

Pour évaluer l'influence des harmoniques sur la PLL classique, nous allons d'abord introduire l'harmonique de rang 5, puis celui de rang 7 avec une amplitude de 10 % de celle du fondamental, et enfin les deux harmoniques 5 et 7 ensemble. Les résultats de la simulation sont présentés dans la figure ci-dessous :

Présence d'harmonique de rang 5 : Les résultats de simulation en présence de 10% d'harmonique de rang 5 par rapport au fondamental sont présentés dans la figure ci-dessous.

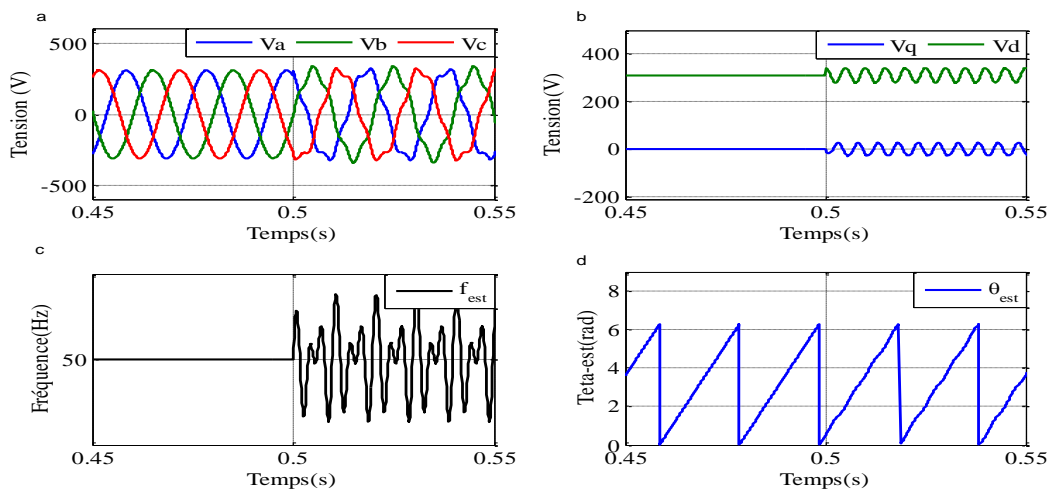


Figure II.10 : Performance de la PLL classique dans le cas de présence d'harmonique du rang 5 de 10% ;(a) tension du réseau, (b) composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c) fréquence estimée, (d)phase instantanée.

Injection d'harmonique 7 : Le résultat d'injection de 10% d'harmonique 7 par rapport au fondamentale sont présentés dans la figure ci-dessous.

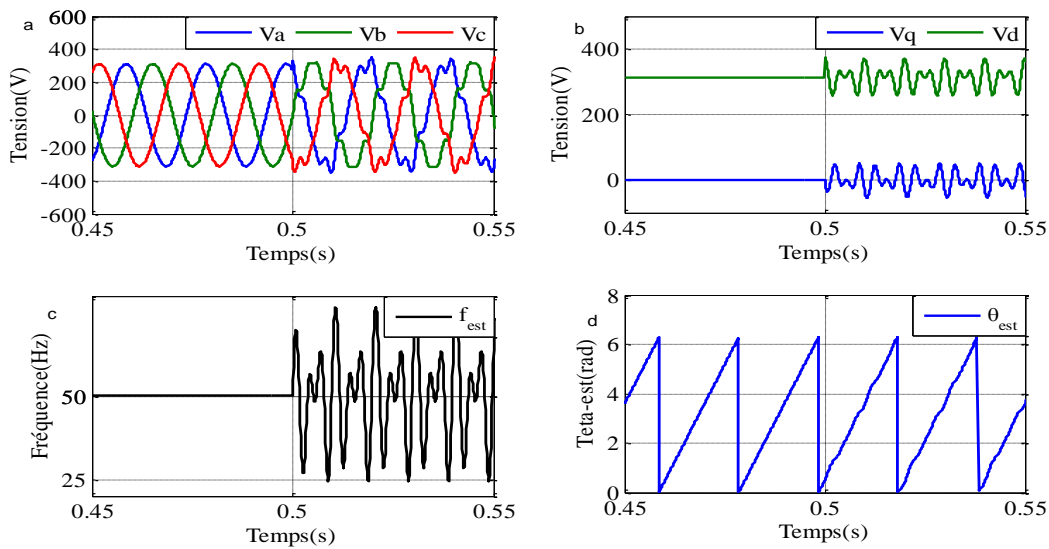


Figure II.11 : Performance de la PLL classique dans le cas de présence d'harmonique du rang 7 de 10% ;(a) tension du réseau, (b) composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c) fréquence estimée, (d)phase instantanée.

Injection d'harmoniques des rangs 5 et 7 : Le résultat d'injection de 10% d'harmonique 5 et 7 à $t=0.5s$ par rapport au fondamental sont présentés dans la figure ci-dessous.

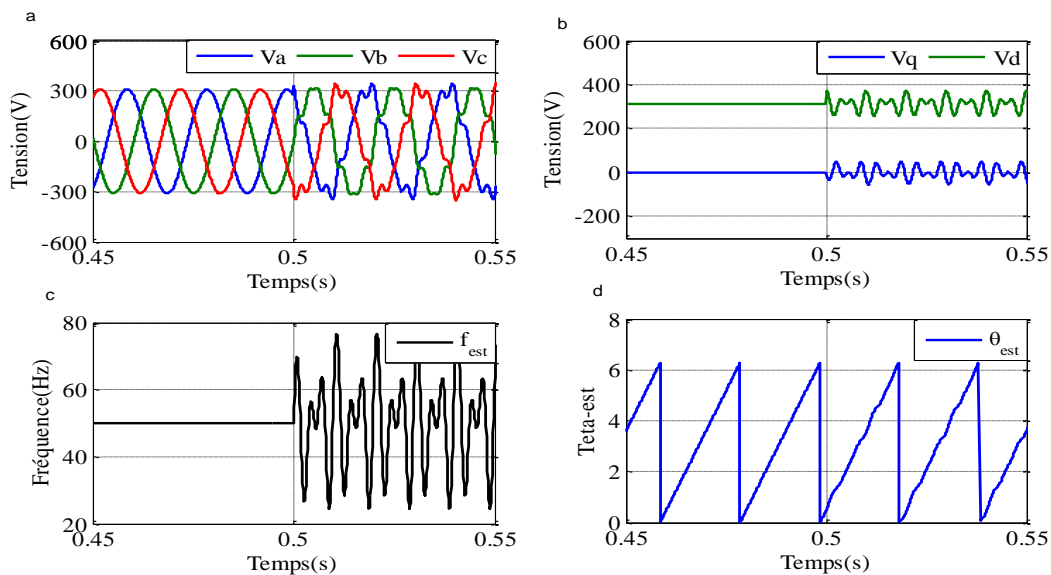


Figure II.12 : Performance de la PLL classique dans le cas de présence des harmoniques du rangs 5 et 7 de 10% ;(a) tension du réseau, (b) composante directe et en quadrature Vd et Vq, (c) fréquence estimée et (d)phase instantanée.

II.6.2 Présence d'un saut de phase

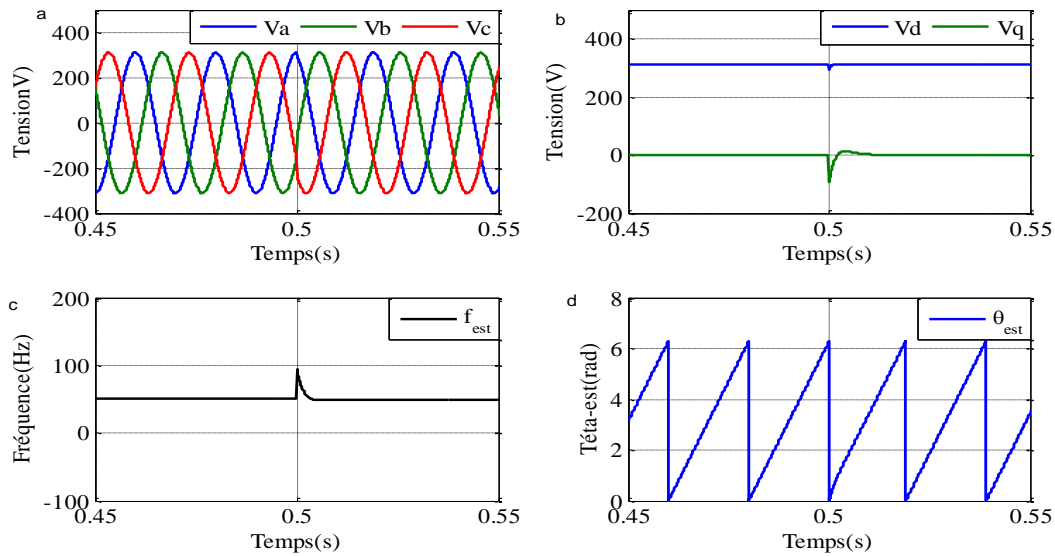


Figure I.13 : Performance de la PLL classique dans le cas d'un saut de phase;(a) tension du réseau, (b) composante directe et en quadrature V_d et V_q , (c) fréquence estimée, (d) phase instantanée.

II.7 Discussion des résultats

Réseau idéal

Dans les conditions idéales, les paramètres choisis pour la PLL, sont très appropriés et assurent un fonctionnement, une régulation et un contrôle efficaces, générant ainsi des résultats et des performances très élevés.

Déséquilibre triphasé

Cet essai simule une chute triphasée des tensions du réseau. Les résultats de simulation indiquent une bonne capacité de la PLL classique à maintenir une synchronisation précise malgré ce déséquilibre. La PLL classique reste donc performante pour ce cas de défaut de réseau.

Déséquilibre biphasé

Cet essai simule un déséquilibre entre deux phases de tension de réseau. Les résultats de simulation montrent la non robustesse de la PLL en présence de déséquilibres entre un nombre limité de phases.

Déséquilibre monophasé

Cet essai simule un déséquilibre d'une seule phase de tension de réseau. Les résultats de cette simulation indiquent la non robustesse de la PLL en présence de déséquilibre d'une seule phase du réseau.

Injection d'harmoniques du rang 5 et 7

Cet essai indique la non robustesse de la PLL classique à rejeter les harmoniques indésirables et à maintenir une synchronisation précise à leurs présences.

Saut de phase

Cette étude simule la réponse de la PLL à un changement soudain de phase dans le signal d'entrée. Les résultats de cette simulation évaluent la capacité de la PLL à maintenir la synchronisation après un tel défaut.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'utilisation de la PLL classique qui est la plus couramment utilisée pour la synchronisation des convertisseurs avec le réseau électrique, puis nous avons examiné l'efficacité de cette technique dans les conditions idéales et en présence de perturbations.

Nous avons fini par constater que cette technique est très performante dans le cas de réseau triphasé idéal, en cas de déséquilibre triphasé et même cas de saut de phase. Cependant, la PLL classique présente des limitations en cas de déséquilibre du type B et C et lors de la présence d'harmoniques.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons une autre technique de synchronisation afin de mettre en évidence les limitations de la PLL classique.

Chapitre III
PPL basée sur la théorie des
signaux retardés

III.1 Introduction

Après avoir constaté les limitations de la PLL classique, ce chapitre sera consacré à une PLL plus évoluée basée sur la théorie des signaux retardés. Nous examinons comment cette approche théorique permet de décomposer les signaux en composantes symétriques instantanées, offrant ainsi une meilleure évaluation du système dans des conditions de réseau perturbé.

Notre analyse se concentre sur défauts, tel que les chutes symétriques de tension, des variations de fréquence, la présence d'harmoniques, les déséquilibres biphasé et monophasé, terminons avec le saut de phase. Nous allons discuter les résultats obtenus à la fin de ce chapitre.

III.2 Les composantes symétriques instantanées

Selon le théorème de Fortescue, un système électrique triphasé de vecteurs déséquilibrés peut se décomposer en trois sous-systèmes de trois vecteurs V_{abc} symétriques : système de séquence directe, système de séquence inverse et système de séquence homopolaire $V_{abc} = V_{abc}^+ + V_{abc}^- + V_{abc}^0$ Cette méthode est fondamentale pour l'analyse des défauts dans les systèmes triphasés déséquilibrés, établissant la base de nombreuses approches traditionnelles [15].[16].

Malgré le niveau de déséquilibre des signaux d'entrée, l'utilisation de l'opérateur de déphasage Fortescue permet de générer un ensemble de trois phases équilibrées décalées de 120° , comprenant des composantes directes et négatives, ainsi qu'un troisième composant homopolaire dont les formes d'onde des trois phases ont une amplitude et une phase identiques [17].

La figure (III.1) ci-dessous illustre la représentation des composantes symétriques.

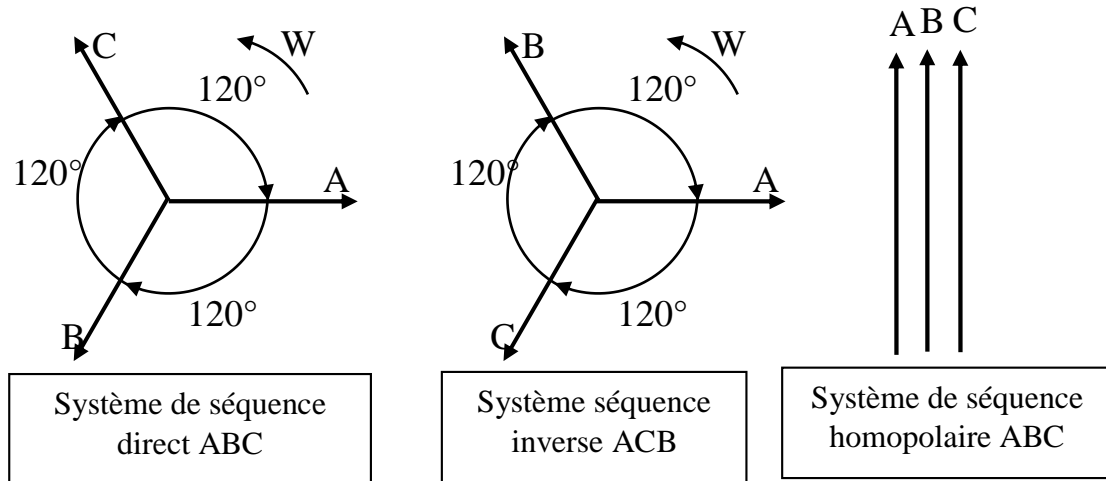


Figure.III.1 : Décomposition en composantes symétriques instantanées

Dans ce qui suit, la phase (A) est utilisée comme une phase de référence.

Pour un système triphasé déséquilibré, les transformations d'un signal triphasés directe positive V_{abc}^+ , directe inverse V_{abc}^- et directe homopolaire V_{abc}^0

$$V_{abc}^+ = [T^+]V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_b^+ \\ V_c^+ \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$$V_{abc}^- = [T^-]V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a^- \\ V_b^- \\ V_c^- \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$V_{abc}^0 = [T^0]V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_b^0 \\ V_c^0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les composantes instantanées positives et négatives de la tension peuvent être transformées en séquences positives et négatives.

Les composants de tension dans le référentiel $\alpha\beta$ peuvent être calculés selon l'équation (III.4), où $J = e^{(-j\pi/2)}$ représente un décalage de phase de 90° appliqué au domaine temporel afin d'obtenir une version en quadrature des formes d'onde d'entrée [17].

$$V_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}]V_{abc} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_b^+ \\ V_c^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} [\mathbf{T}^+] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$= \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} [\mathbf{T}^+] \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -j \\ j & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a^- \\ V_\beta^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^- \\ V_b^- \\ V_c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} [\mathbf{T}^-] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$$= \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} [\mathbf{T}^-] \begin{bmatrix} T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & j \\ -j & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

En supposant que le vecteur asymétrique peut être écrit dans le domaine temporel de la manière suivante :

$$V_a(t) = V_a \cos(\omega t) \quad (\text{III.7})$$

$$V_\beta(t) = V_\beta \sin(\omega t) \quad (\text{III.8})$$

L'opérateur de déphasage $-j$ peut être défini comme un retard de $(T/4)$ dans le domaine temporel, si on connaît la fréquence et la période T . L'équation décomposée en composantes ***a*** et ***β*** pour les séquences positives et négatives s'écrit comme suit [8] :

$$V_a^+ = \frac{1}{2} \left(V_a(t) - V_\beta \left(t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (\text{III.9})$$

$$V_\beta^+ = \frac{1}{2} \left(V_\beta(t) + V_a \left(t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (\text{III.10})$$

$$V_a^- = \frac{1}{2} \left(V_a(t) + V_\beta \left(t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (\text{III.11})$$

$$V_\beta^- = \frac{1}{2} \left(V_\beta(t) - V_a \left(t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (\text{III.12})$$

De manière équivalente sous forme vectoriel complexe, les équations (III.13) et (III.14) peuvent être écrites comme suit :

$$\bar{V}_{\alpha\beta}^+(t) = \frac{1}{2} \left(\bar{V}_{\alpha\beta}(t) + j \bar{V}_{\alpha\beta} \left(t - \frac{T_0}{4} \right) \right) \quad (\text{III.13})$$

$$\bar{V}_{\alpha\beta}^-(t) = \frac{1}{2} \left(\bar{V}_{\alpha\beta}(t) - j \bar{V}_{\alpha\beta} \left(t - \frac{T_0}{4} \right) \right) \quad (\text{III.14})$$

Si on décale le vecteur de tension d'un quart de la période de la période, on obtient un nouveau vecteur avec une séquence positive et une composante de séquence négative de même amplitude mais de sens opposé. Lorsque ce vecteur décalé est ajouté au vecteur de tension, la composante de séquence négative est supprimée. Pour réaliser cette décomposition, il faut deux blocs avec un retard de phase de 90° pour une fréquence donnée. Cela permet de simuler et d'analyser le comportement de la PLL basée sur le signal retardé [8].

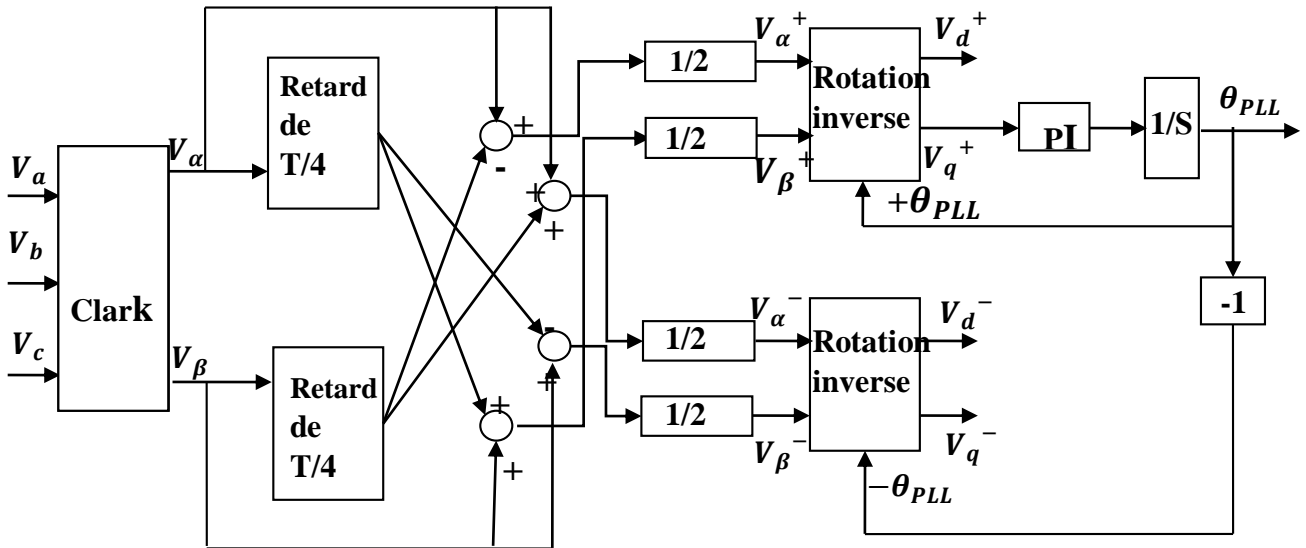


Figure.III.2. Bloc de simulation d'un PLL basée sur le signal retardé de T/4.

III.3 Simulation et analyse du comportement de PLL basée sur la théorie des signaux retardés

Le système est basé sur le signal retardé de $(T/4)$, est testé en faisant des simulations sur Matlab Simulink. Ces simulations sont réalisées pour évaluer le comportement de la technique de retard de transport $T/4$, avec T la période de fréquence fondamentale de la grille, est la fréquence fondamentale.

III.3.1 Réseau idéal

En choisissant un amortissement $\xi = 1$ un temps de réponse en boucle fermée ($Tr=0.7$ ms) sachant que $V_m = 220\sqrt{2}$ nous obtenons :

$$K_p=3.0856 \text{ et } K_i= 740.5336$$

Les résultats de la simulation imposant un retard de $(T/4)$ à la PLL sur un réseau triphasé équilibré sont présentés aux figures ci-dessous :

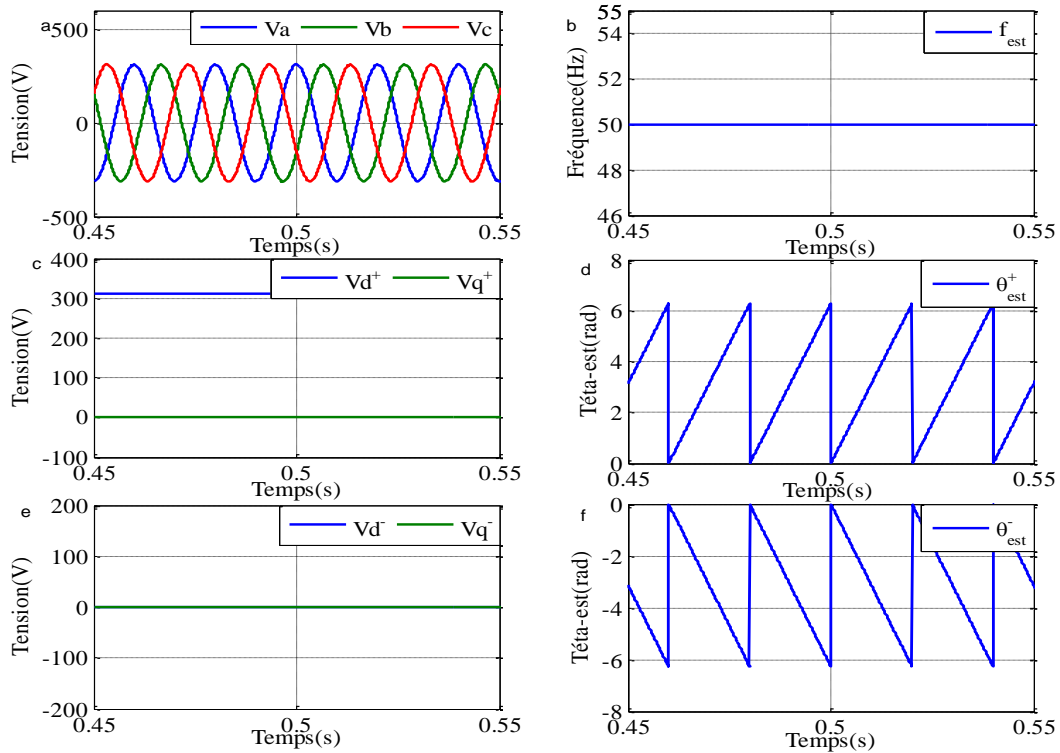


Figure III.3 : Performances de PLL basé sur les signaux retardés de $(T/4)$ pour réseau idéal triphasé, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.3.2 Chute symétrique de tension triphasée

La figure (III.4) montre les résultats de simulation de la PLL basée sur la théorie des signaux retardés, sous une chute symétrique de tension de 25% par rapport au réseau fondamental, cela apparaît à l'instant $t = 0.5s$, avec une fréquence 50Hz. On montre aussi dans les sous-figures a, b, c, d, e, f ; les tensions fournies par cette PLL (V_d , V_q), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

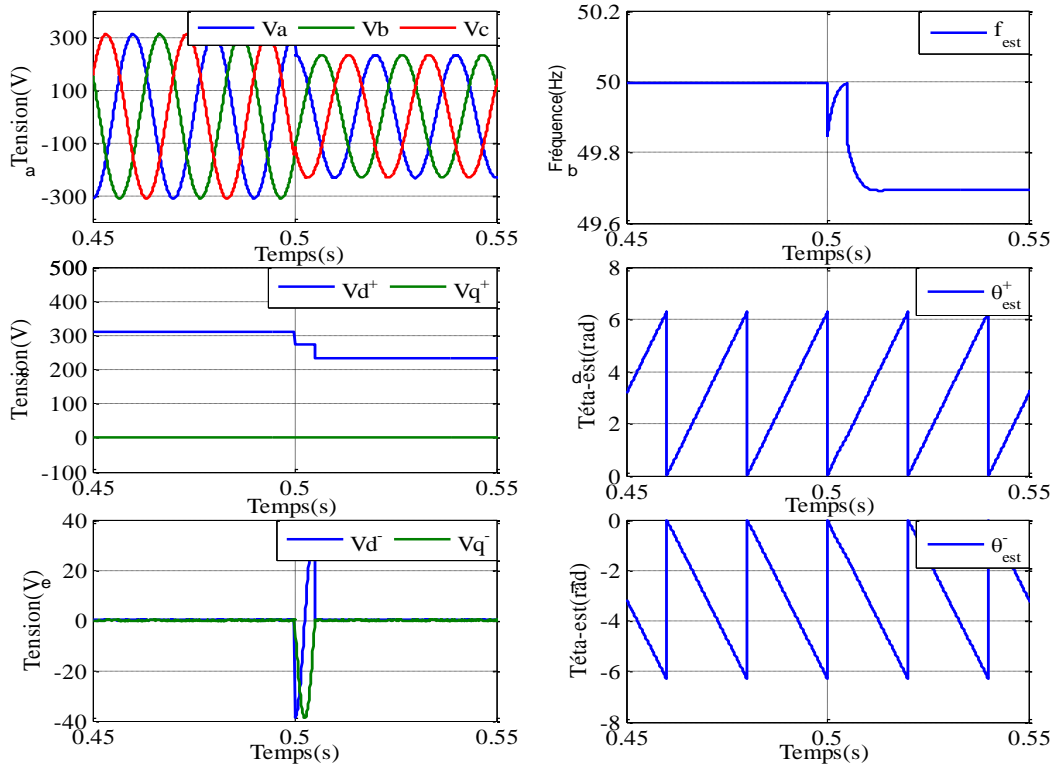


Figure III.4 : Performance de PLL basée sur la théorie des signaux retardés de (T/4) pour une chute symétrique des trois tensions du réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composante positive directe et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composante négative directe et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.3.3 Chute monophasée

La figure (III.5) montre les résultats de simulation de la PLL basée sur la théorie des signaux retardés, sous une chute de tension de 35% dans une seule phase par rapport au réseau fondamental, cela apparaît à l'instant $t = 0.5s$, avec une fréquence 50Hz. On montre aussi dans les sous-figures a, b, c, d, e, f ; les tensions fournies par cette PLL (V_d , V_q), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

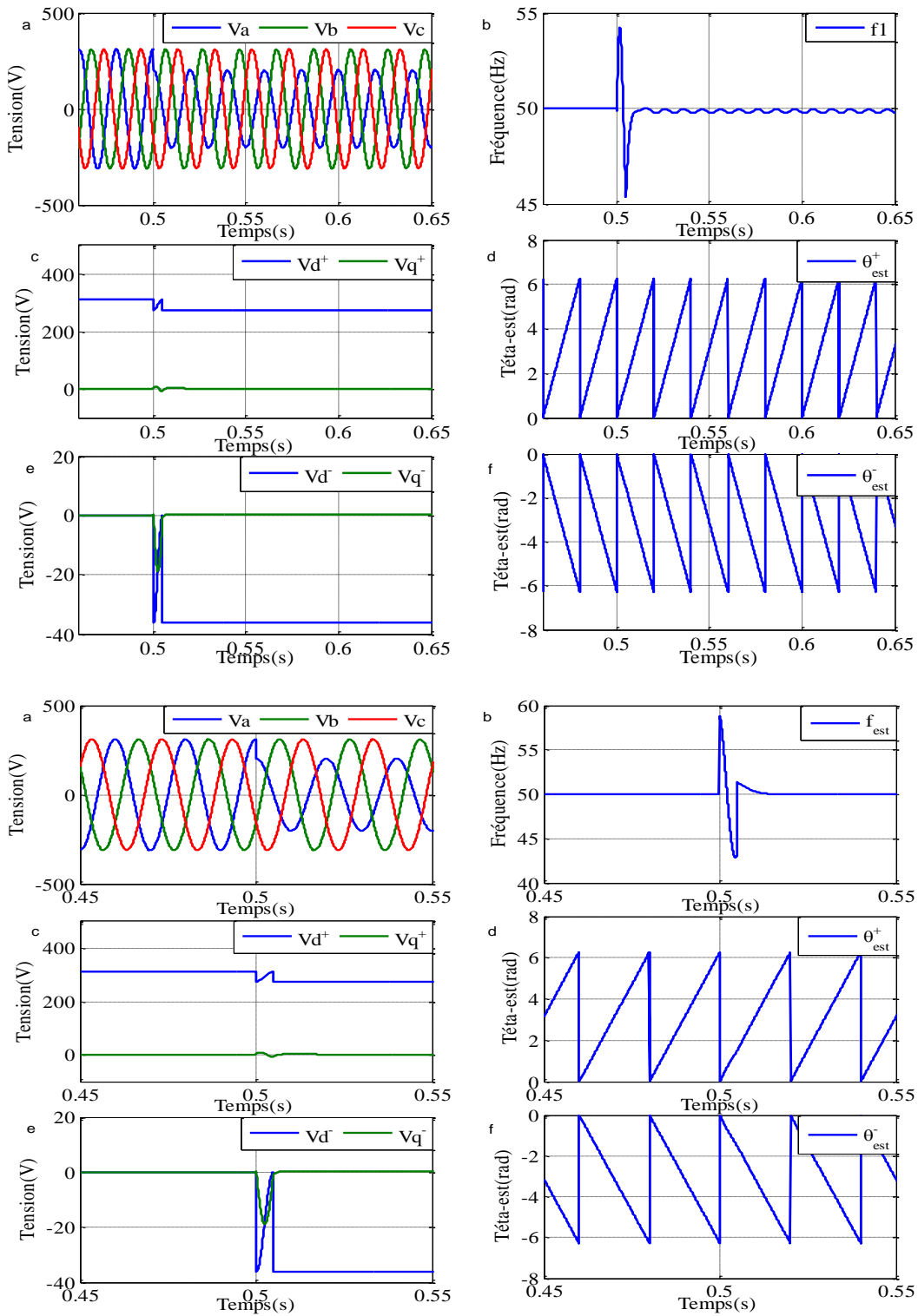


Figure III.5 : Performances de PLL basé sur les signaux retardés de $(T/4)$ pour une chute monophasée dans le réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.3.4 Chute biphasée

Dans cette étude, à $t = 0.5s$, on a observé une chute de tension biphasée de 40% au niveau des phases Va et Vb par rapport à leur valeur initiale. Cela est présenté dans la figure (III.6)

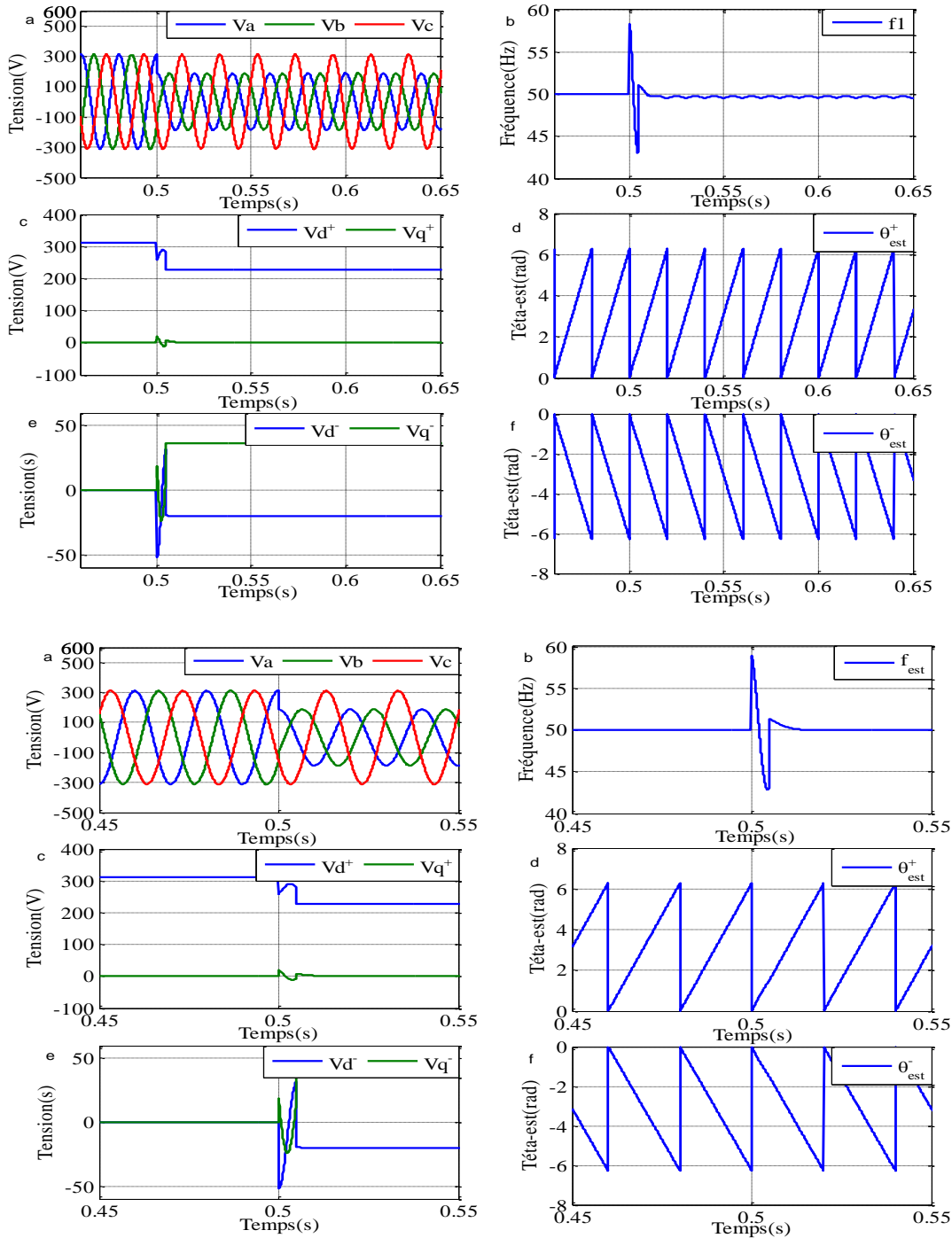


Figure III.6 : Performances PLL basé sur les signaux retardé de $(T/4)$ pour une chute biphasée dans le réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

Remarque :

Dans ces deux derniers essais (chutes monophasée et biphasée), on a diminué la période d'échantillonnage de $T_s = 0.001s$ à $T_s = 0.000001s$ dans le but d'une meilleure précision au niveau de la fréquence estimée.

III.3.5 Déviation de fréquence

Cet essai se compose en deux parties, la première est l'augmentation de fréquence de 50Hz à 55Hz à $t=0.2s$ comme présentée dans la figure (III.7.1) ; La deuxième partie illustre la diminution de cette fréquence de 55Hz à 45Hz à $t=0.6s$ dans la figure (III.7.2)

Les sous-figures a, b, c, d, e, f affichent les tensions fournies par cette PLL ($V_d^+, V_q^+; V_d^-, V_q^-$), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

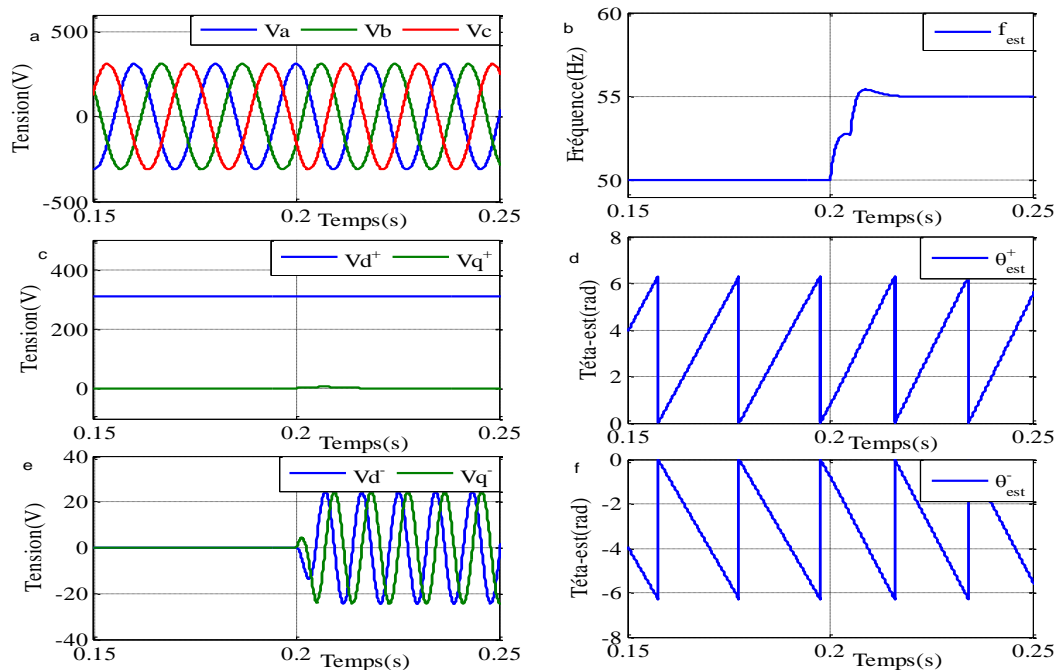


Figure III.7.1 : Performances de PLL basées sur les signaux retardés de $(T/4)$ pour une variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f=55$ Hz, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composante positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composante négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

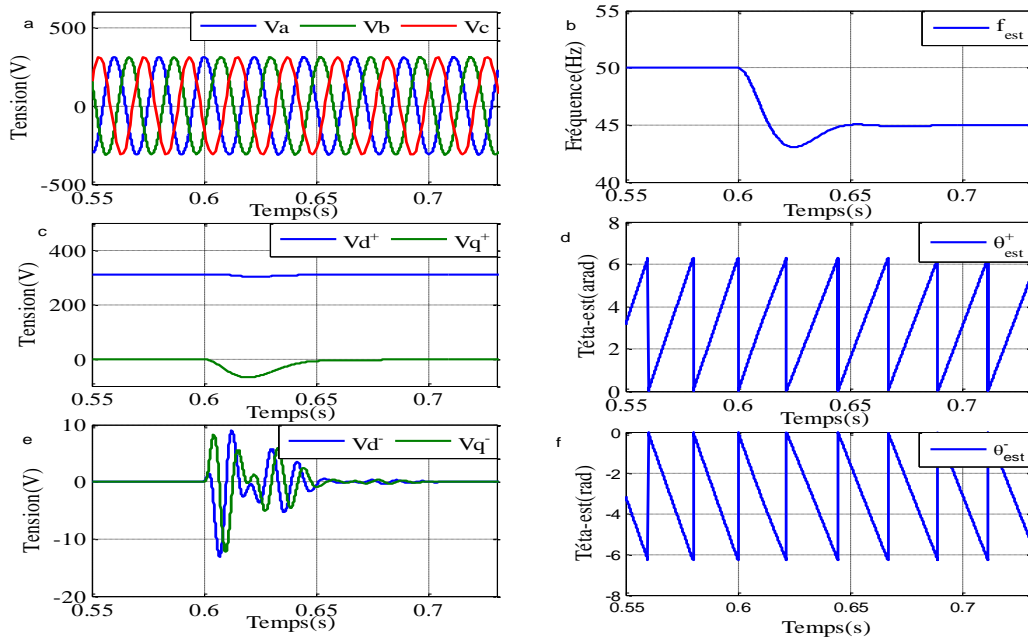


Figure III.7.2 : Performances de la PLL basé sur les signaux retardés de $(T/4)$ pour une variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f=45$ (Hz), (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composante négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.3.6 Présence d'harmoniques

Dans cet essai, on a voulu étudier l'effet des harmoniques en simulant leur présence dans les signaux. On a ajouté des harmoniques du rang 5 à l'instant $t=0.5s$ dans la figure (III.8.1) puis on a injecté l'harmonique du rang 7 à l'instant $t = 0.5s$ illustré dans la figure (III.8.2). Et les deux harmoniques (du rang 5 et 7) au même temps à l'instant $t = 0.5s$ sur la figure (III.8.3)

Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures (III.8.1), (III.8.2) et figure (III.8.3) respectivement. Ce qui nous permet de mieux comprendre l'impact des harmoniques sur le système électrique.

- Injection d'harmoniques du rang 5

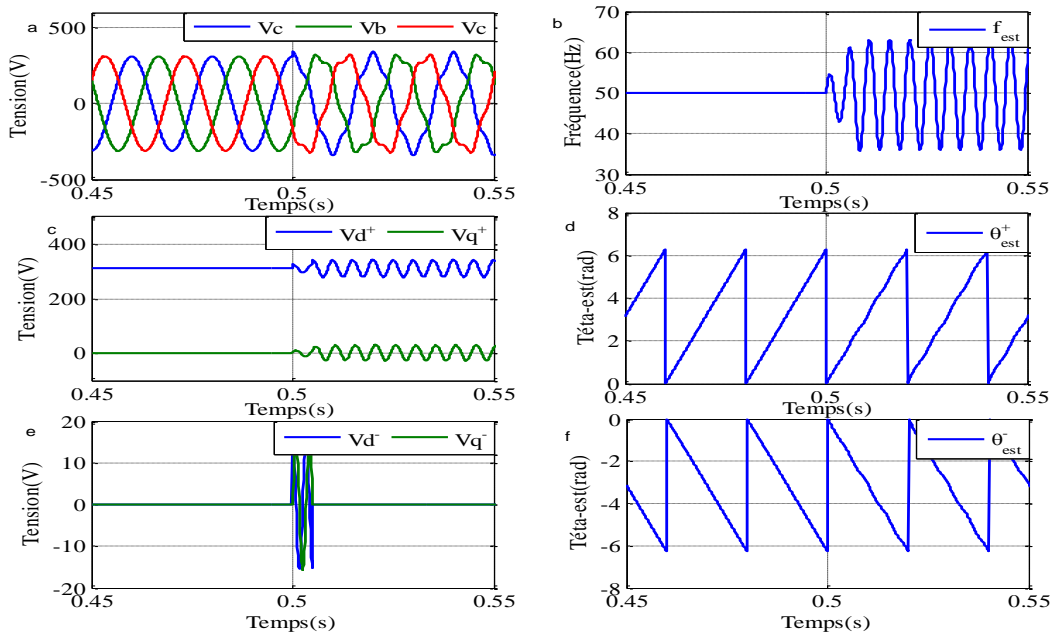


Figure III.8.1 : Performances de PLL basé sur les signaux retardé de $(T/4)$ pour une présence d'harmonique dans un réseau électrique, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

- Injection d'harmoniques du rang 7

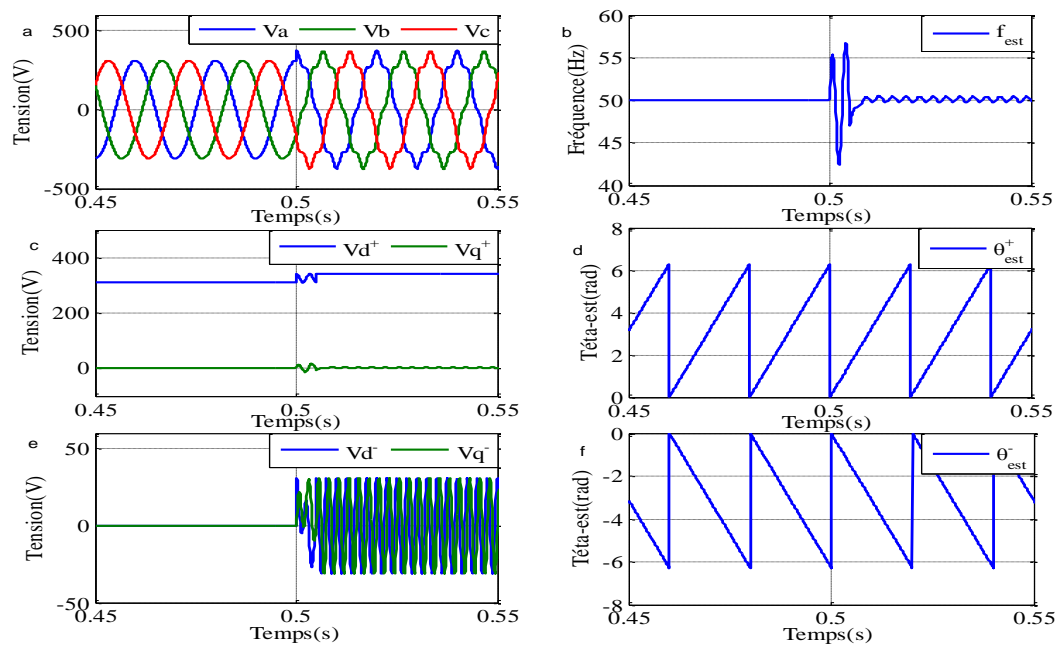


Figure III.8.2 : Performances de PLL basé sur les signaux retardé de $(T/4)$ pour une présence d'harmonique dans un réseau électrique, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ ; (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

- Injection d'harmoniques du rang 5 et 7

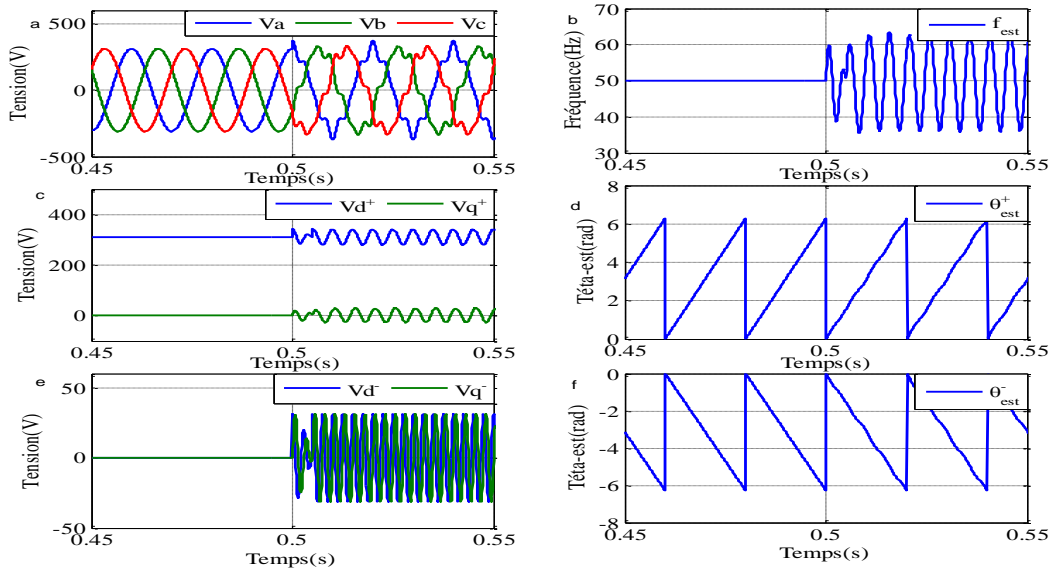


Figure III.8.3 : Performances de PLL basé sur les signaux retardé de (T/4) pour une présence d'harmonique dans un réseau électrique, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_{d^+} et V_{q^+} ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ (e) composantes négatives directes et en quadrature V_{d^-} et V_{q^-} , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.3.7 Présence d'un Saut de phase

Dans cet essai, on a injecté le saut de phase a $t=0.5s$, Cela est présenté dans la figure III.9.

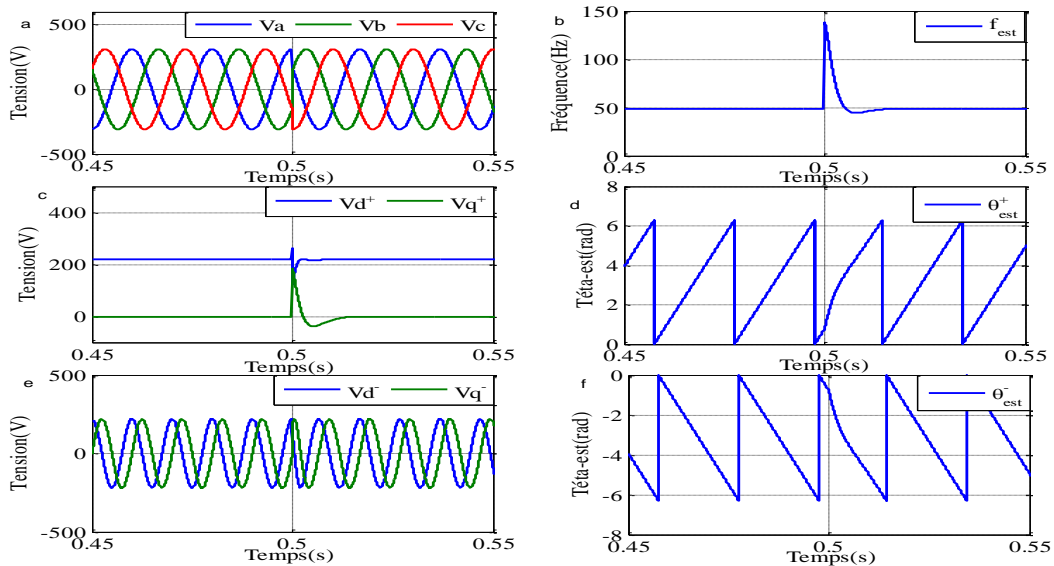


Figure III.9 : Performances de PLL basé sur les signaux retardé de (T/4) pour une présence d'un saut phase dans un réseau électrique, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_{d^+} et V_{q^+} ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_{d^-} et V_{q^-} , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

III.4 Discussion des résultats

En comparant avec les résultats du chapitre précédent, on peut voir que les tensions et la fréquence estimée ne présentent pas d'oscillations. De plus, on remarque que l'angle de la phase instantanée positive est bien estimé, ce qui est dû au retard imposé à la PLL basée sur la théorie des signaux retardés. C'est une observation intéressante qui montre une amélioration dans la performance de PLL basée sur la théorie des signaux retardés.

Réseau idéale

A l'application de cette méthode, on n'enregistre aucun changement par rapport aux résultats obtenus dans la méthode présentée dans le chapitre précédent (PLL classique)

Chute symétrique triphasée

D'après la figure (III.4), nous observons que suite à l'application d'une chute symétrique de tension à $t = 0.5s$, la tension V_q^+ , la fréquence estimée et la phase instantanée estimée restent inchangées par rapport aux résultats obtenus dans le chapitre précédent (avec une chute symétrique de tension).

Cependant, nous remarquons que la tension de sortie de la PLL basée sur la théorie des signaux retardés, V_d^+ , met plus de temps à chuter de 25% par rapport à la durée de chute de V_q^+ dans le chapitre précédent, en raison du retard imposé.

Chute biphasée et monophasée

En comparant aux résultats du chapitre précédent, nous constatons que les tensions résultantes et la fréquence estimée ne présentent pas d'oscillations. De plus, nous observons que l'angle de la phase instantanée positive n'est pas correctement estimé, on registre une présence d'oscillations.

Le résultat est amélioré par rapport au chapitre précédent ce qui est attribuable au retard imposé à la PLL basée sur la théorie des signaux retardés.

Déviations de fréquence

Dans cette expérimentation, nous avons constaté que les résultats obtenus sont similaires à ceux du chapitre précédent en ce qui concerne les tensions V_d et V_q et la phase instantanée estimée positive. Cependant, nous remarquons qu'au moment de la perturbation (figure III.7.1 et figure III.7.2), lorsque la fréquence augmente ou diminue, cette déviation se produit de manière légèrement plus lente par rapport aux résultats obtenus dans le chapitre I (variation de la fréquence en fonction du temps), et cela est dû au retard ($T/4$) induit par la PLL basée sur la théorie des signaux retardés.

Présence d'harmonique

Lorsque des harmoniques du 5 et du 7 rang sont présentes, nous avons constaté des résultats similaires à ceux du chapitre précédent. En d'autres termes, au moment de l'application de la perturbation ($t = 0.5s$), les formes d'onde des tensions résultantes à la sortie de la PLL, la fréquence estimée et la période de l'oscillation estimée θ oscillent.

Saut de phase

Dans le cas d'injection d'un saut de phase, les résultats obtenus (figure III.9) sont les mêmes avec les résultats de chapitre précédent.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit l'implémentation de la méthode de décomposition des composantes symétriques, basée sur une décomposition en deux phases largement reconnues. Bien que cette méthode offre des avantages tel que l'annulation du déséquilibre du réseau électrique, grâce au retard ($-T/4$), elle présente également plusieurs inconvénients tel que la non robustesse face aux harmoniques.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder une méthode plus performante qui peut assurer des résultats satisfaisants indiqueraient une bonne capacité de la PLL à maintenir la synchronisation dans des conditions de réseau réelles où les déséquilibres triphasés.

Chapitre IV
PLL basé sur intégration
généralisé du deuxième ordre
(SOGI-PLL)

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter ce qui est exactement la PLL basée sur un intégrateur généralisé du deuxième ordre (SOGI-PLL) qui est souvent utilisé pour améliorer la performance d'une boucle à verrouillage de phase (PLL), ensuite on va aborder sa modélisation, enfin on va explorer sa simulation sur Matlab Simulink et analyser les résultats obtenus.

Cette approche permettra de saisir pleinement le contenu et les objectifs de ce chapitre.

IV.2 Définition

Les intégrateurs généralisés du second ordre (SOGI) ont récemment été proposés pour être utilisés comme détecteurs de phase [18] et détecteurs de tension directe [19] en particulier dans les structures PLL des onduleurs connectés au réseau.

SOGI-PLL est une méthode avancée, conçue pour traiter des signaux sinusoïdaux avec une grande précision. Elle permet de séparer les composantes d'un signal et d'obtenir des représentations en quadrature.

De nombreuses techniques de synchronisation sur grille existante, présentant des performances, des objectifs et une complexité variée [20]. Parmi eux, s'appuient sur un détecteur de phase qui offre une certaine immunité aux distorsions de forme d'onde de tension (harmoniques et/ou déséquilibres). Cette immunité, liée aux techniques de filtrage employées, est souvent un compromis difficile avec d'autres attentes en termes de performances dynamiques (suivi de phase et/ou d'amplitude).

IV.3 Structure générale du SOGI

Les structures SOGI sont principalement composées de deux types de filtres. Tout d'abord, un filtre passe-bande sans retard de phase à la fréquence fondamentale est utilisé pour l'estimation de la tension de phase v' . Deuxièmement, un filtre passe-bas avec un retard de phase de 90° est utilisé pour l'estimation du signal décalé en quadrature qv' . Par conséquent, la structure SOGI présente l'avantage de fournir un accès simultané à la fois à la sortie filtrée ainsi qu'à une version décalée en quadrature de la même sortie (axes α et β). En tant que tels, ils permettent une mise en œuvre facile qui peut s'adapter à celle des PLL classiques (en utilisant la transformation de Park comme détecteur de phase) [21].

IV.4 Principe de fonctionnement

Cet intégrateur repose sur le principe que la convolution dans le domaine temporel d'une fonction sinusoïdale génère à nouveau la fonction d'origine. Dans cette approche, les signaux en quadrature, c'est-à-dire décalés de 90° degrés, pour V_{abc} sont calculés à l'aide de deux intégrateurs généralisés de second ordre, utilisant un signal en quadrature (SOGI-QSG).

Le SOGI-PLL est basée sur un QSG et consiste généralement composer de trois étages : une fréquence. Et un générateur d'angle de phase.

Le détecteur de phase est construit avec un QSG et un Park étape de transformation. Le QSG est construit autour d'un SOGI, qui contribue à fournir des caractéristiques du filtre au QSG. Par conséquent, la structure complète du SOGI-PLL contient, en plus d'un filtre en boucle, un étage de pré-filtrage adaptatif, contribuant à l'amélioration du rejet harmonique et à la tolérance du SOGI-PLL aux changements de fréquence.

La fréquence angulaire centrale du filtre adaptatif est représentée par ' ω' ', et ' k ' désigne le gain du bloc SOGI. Les équations ci-dessous illustrent des comportements de filtres passe-bande et passe-bas respectivement. De plus, l'équation (2) montre un décalage constant de 90 degrés entre les signaux ' qv' ' et ' v' '. Ce décalage ne varie pas en fonction des modifications de ' ω' ' et ' k ', ce qui résulte en un système qui reste insensible aux fluctuations de fréquence du signal d'entrée lorsque ' ω' ' égale la fréquence angulaire de ' v' '.

Le schéma fonctionnel du SOGI-PLL qui se comporte comme un intégrateur à gain infini et sa fonction de transfert.

$$SOGI(s) = \frac{v'}{k\epsilon v} (s) = \frac{w's}{s^2+w'^2} \quad (IV.1)$$

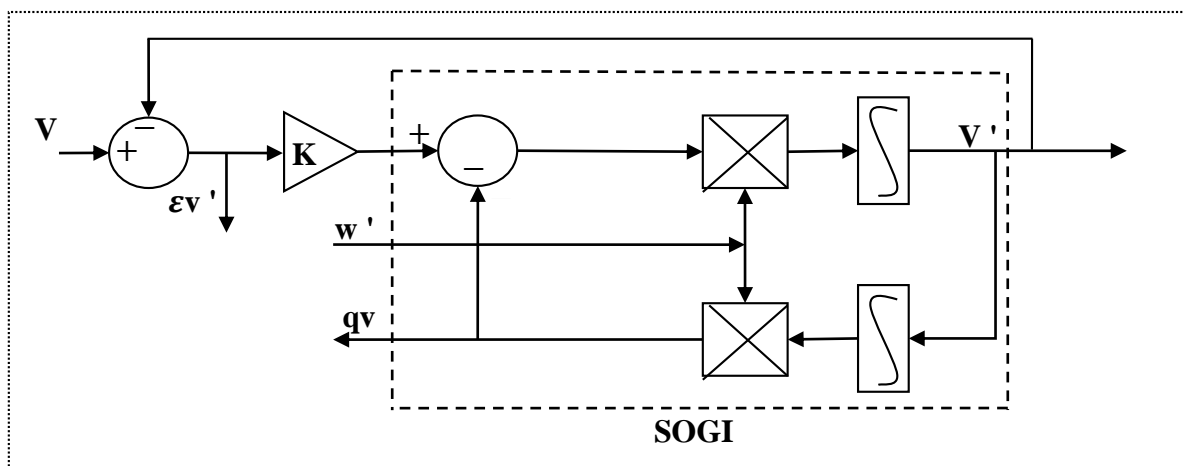


Figure IV.1. Schéma fonctionnel d'un SOGI.

IV.5 Modélisation du SOGI-PLL

IV.5.1. Fonctions de transfert du SOGI-PLL

A partir du schéma précédent, les fonctions de transfert suivantes peuvent être dérivées :

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega' s}{s^2 + k s \omega' + \omega'^2} \quad (\text{IV.2})$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2} \quad (\text{IV.3})$$

Où ω' représente la fréquence fondamentale estimée et k le facteur d'amortissement du bloc SOGI (appelé aussi gain du SOGI).

Le paramètre ω' centre la fonction de transfert des filtres, tandis que le paramètre k joue un rôle important dans l'ajustement de la bande passante du filtre.

Il est important de noter que le facteur d'amortissement k ne modifie pas le comportement du SOGI à la fréquence ω' [21].

IV.5.2. Choix du gain du SOGI

Une augmentation de k accélère la réponse aux changements de tensions mais détériore la sélectivité en fréquence tandis qu'une baisse de k Cette valeur améliore la sélectivité en fréquence mais ralentit la réponse aux changements de tension.

Il faut donc trouver un compromis entre temps transitoire et atténuation de la distorsion. Un réglage couramment adopté est $k = \sqrt{2}$ [21].

IV.6 Implémentation du SOGI-PLL dans un réseau triphasé

La structure quelque peu équivalente de la structure présentée ci-dessus pour les systèmes triphasés est donnée ci-dessous. Dans ce cas, deux SOGI sont utilisés, non seulement pour bénéficier de leurs caractéristiques de filtrage mais également pour combiner leurs sorties afin de détecter exclusivement la séquence positive. Cette approche, désignée DSOGI-PLL par leurs auteurs [19], offre une excellente immunité contre les déséquilibres de tension du réseau.

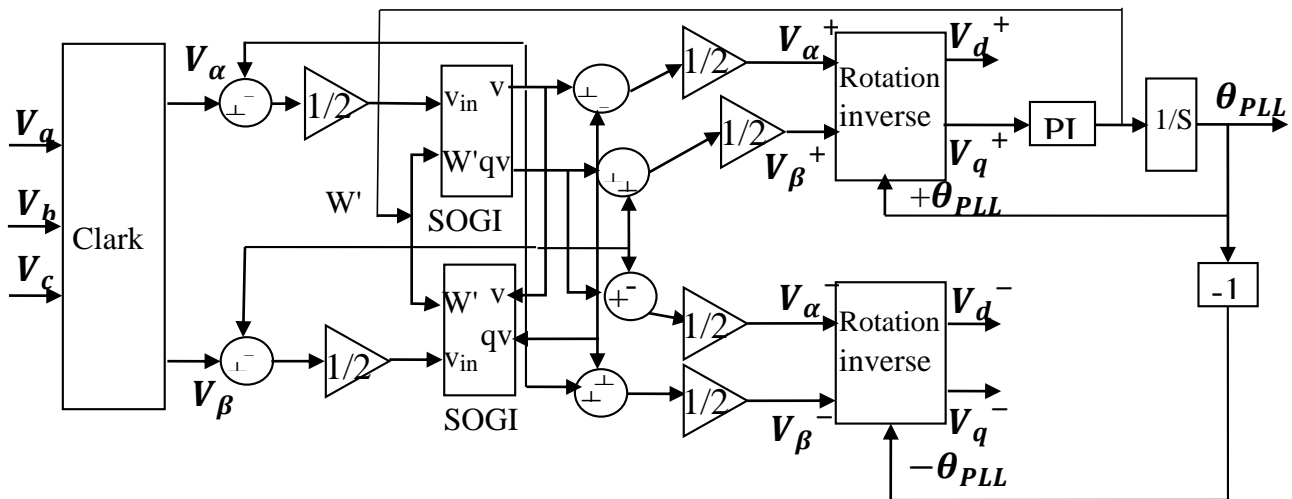


Figure IV.2. Bloc de simulation d'un PLL basée sur SOGI.

IV.7 Simulation et analyse le comportement du SOGI_PLL

IV.7.1. Réseau idéal

En choisissant un amortissement $\xi = 1$ un temps de réponse en boucle fermé ($Tr=0.7$ ms) sachant que $V_m = 220\sqrt{2}$ nous obtenons :

$$K_p=3.0856 \text{ et } K_i= 740.5336$$

Les résultats de la simulation du SOGI-PLL sur un réseau triphasé équilibré sont présentés aux figures ci-dessous :

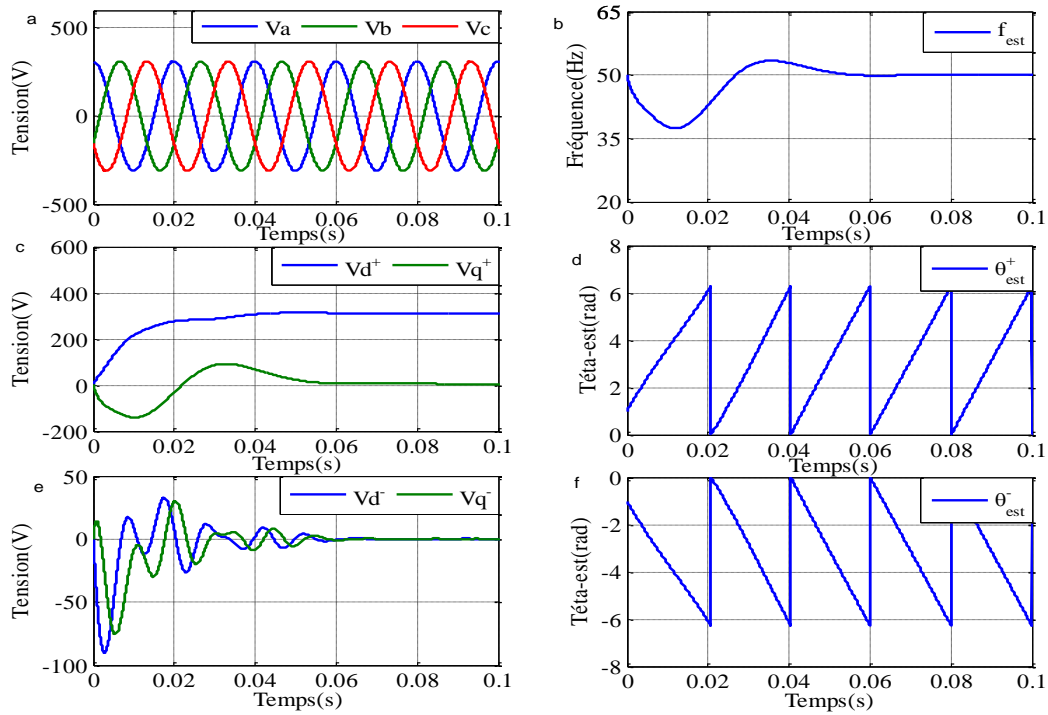


Figure IV.3 : Performances du SOGI-PLL pour réseau triphasé idéal, (a) tension du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.2. Chute symétrique triphasée

La figure (IV.4) montre les résultats de simulation du SOGI-PLL, sous une chute symétrique de tension de 25% par rapport au réseau fondamental, cela apparait à l'instant $t=0.5s$, avec une fréquence 50Hz. On montre aussi dans les sous-figures a, b, c, d, e, f ; les tensions fournies par cette PLL (V_d , V_q), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

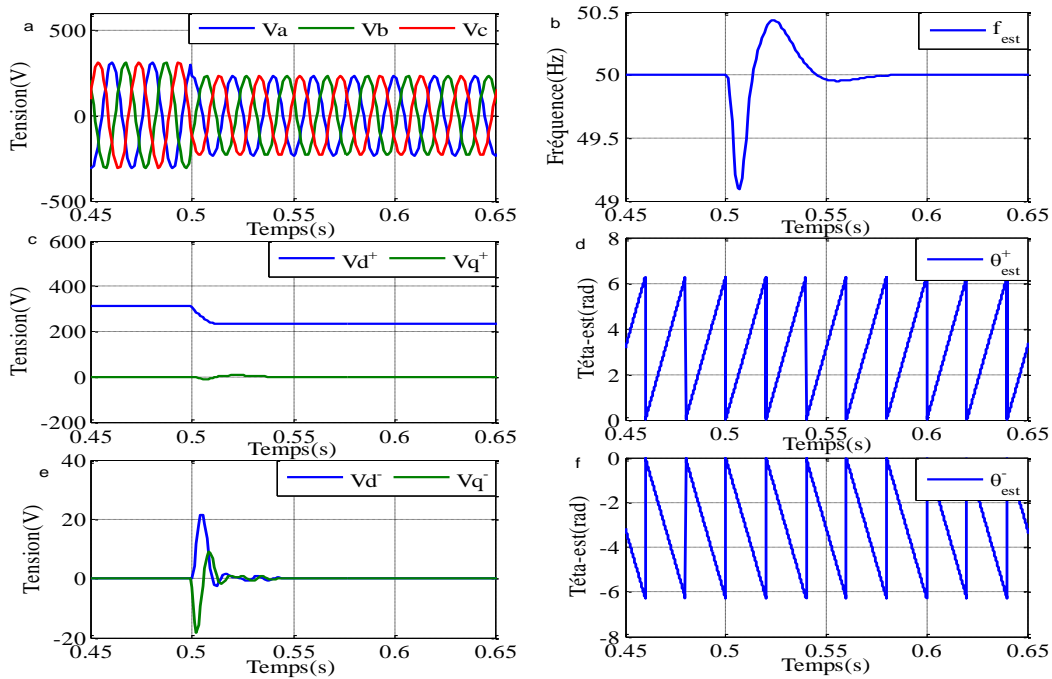


Figure IV.4 : Performances du SOGI_PLL pour une chute symétrique des trois tensions du réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.3. Chute monophasée

La figure (IV.5) montre les résultats de simulation du SOGI-PLL sous une chute de tension d'une seule phase de 35% par rapport au réseau fondamental, cela apparait à l'instant $t=0.5s$, avec une fréquence 50Hz. On montre aussi dans les sous-figures a, b, c, d, e, f ; les tensions fournies par cette PLL (V_d , V_q), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

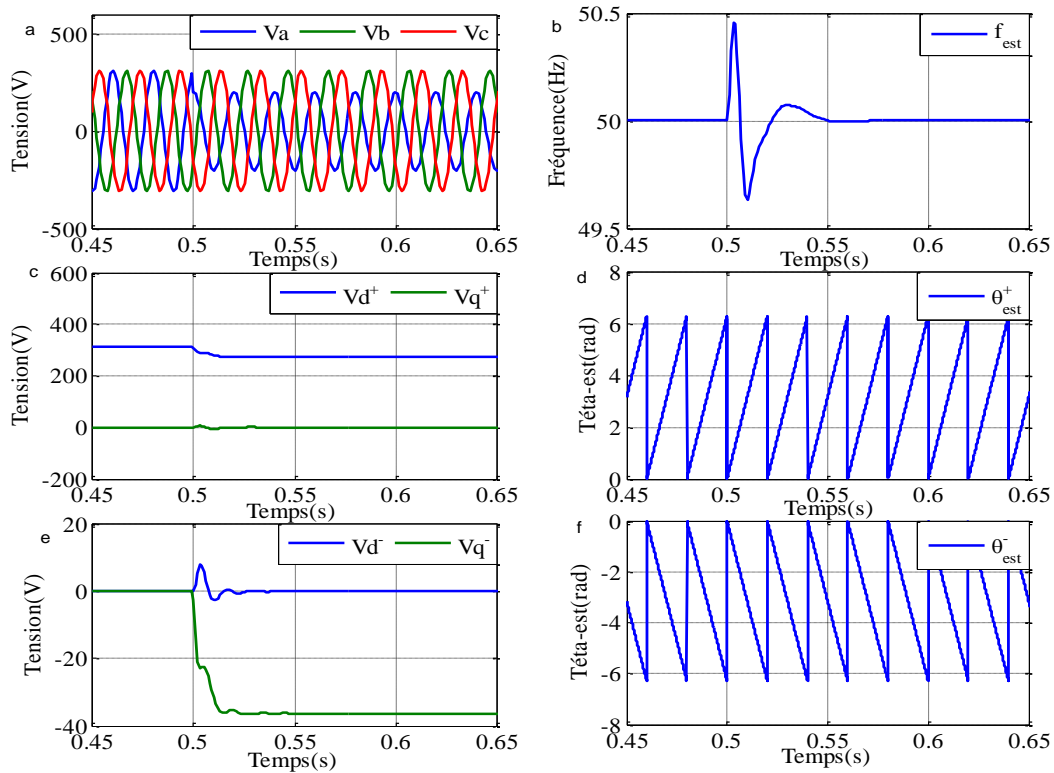


Figure IV.5 : Performances du SOGI_PLL pour une chute monophasée dans le réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directe et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.4. Chute biphasée

La figure (IV.6) montre les résultats de simulation du SOGI-PLL sous une chute de tension de deux phases de 40% par rapport au réseau fondamental, cela apparait à l'instant $t= 0.5s$, avec une fréquence 50Hz. On montre aussi dans les sous-figures a, b, c, d, e, f ; les tensions fournies par cette PLL (V_d , V_q) positives et négatives, la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

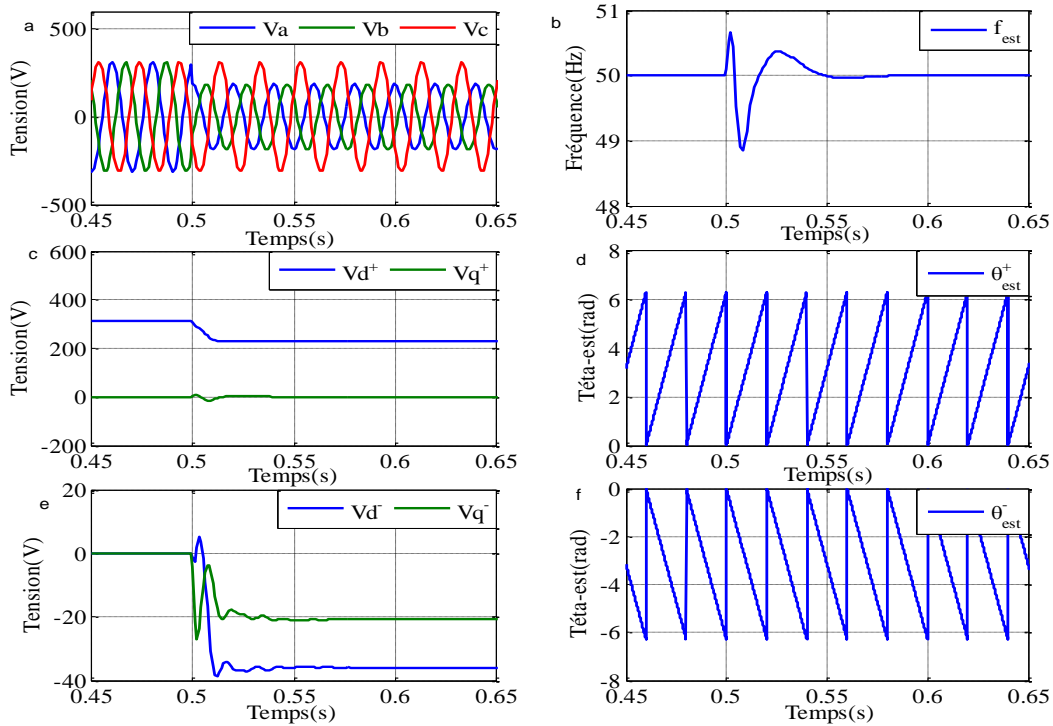


Figure IV.6 : Performances de SOGI-PLL pour une chute biphassée dans le réseau, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.5. Déviation de fréquence

Cet essai se compose en deux parties, la première est l'augmentation de fréquence de 50Hz à 55Hz comme présentée dans la figure (IV.7.1) à $t=0.2(s)$; La deuxième partie illustre la diminution de cette fréquence de 55Hz à 45Hz dans la figure (IV.7.2), cette déviation apparaît à l'instant $t=0.6s$

Les sous-figures a, b, c, d, e, f affichent les tensions fournies par cette PLL ($V_d^+, V_q^+; V_d^-, V_q^-$), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau.

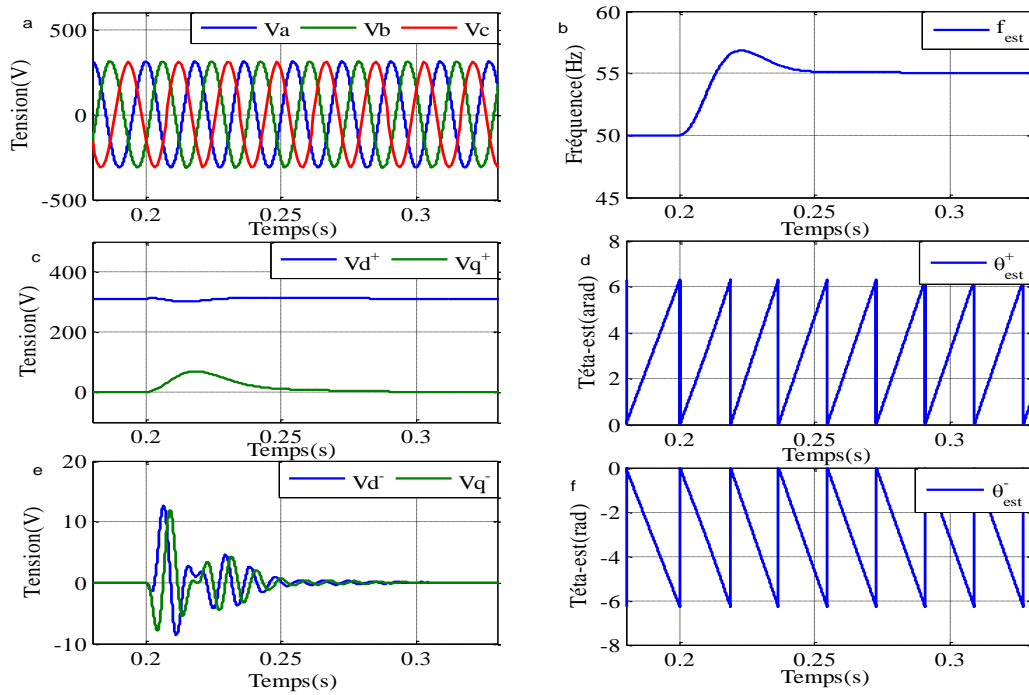


Figure IV.7.1. Performances de SOGI_PLL pour une variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f=55$ Hz, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

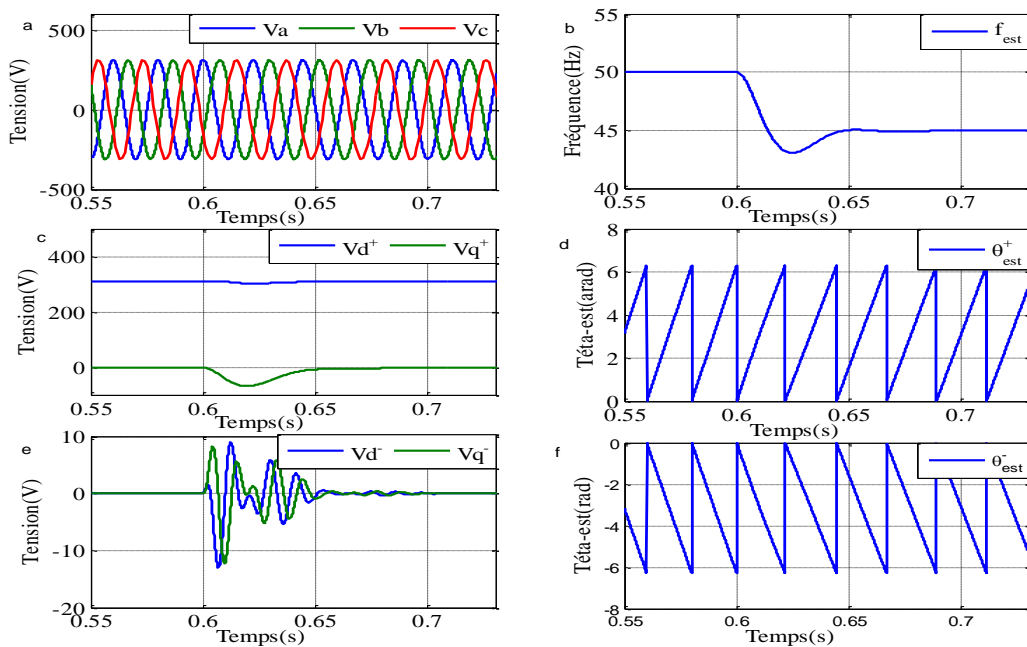


Figure IV.7.2. Performances de SOGI_PLL pour une variation de fréquence de $f=50$ Hz jusqu'à $f=45$ Hz, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ , (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.6. Présence d'harmoniques

Dans cette expérimentation, on a étudié l'effet des harmoniques en simulant leur présence dans les signaux. On a ajouté des harmoniques du rang 5 à l'instant $t=0.5s$ dans la figure (IV.8.1) puis on a injecté l'harmonique du rang 7 à l'instant $t = 0.5s$ illustré dans la figure (IV.8.2). Et les deux harmoniques (du rang 5 et 7) au même temps à l'instant $t = 0.5s$ sur la figure (IV.8.3). Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures (IV.8.1), (IV.8.2) et figure (IV.8.3) respectivement et les sous-figures a, b, c, d, e, f affichent les tensions fournies par cette PLL ($V_d^+, V_q^+; V_d^-, V_q^-$), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau. Ce qui nous permet de mieux comprendre comment le SOGI-PLL agit face à ces harmoniques.

- Injection d'harmonique du rang 5

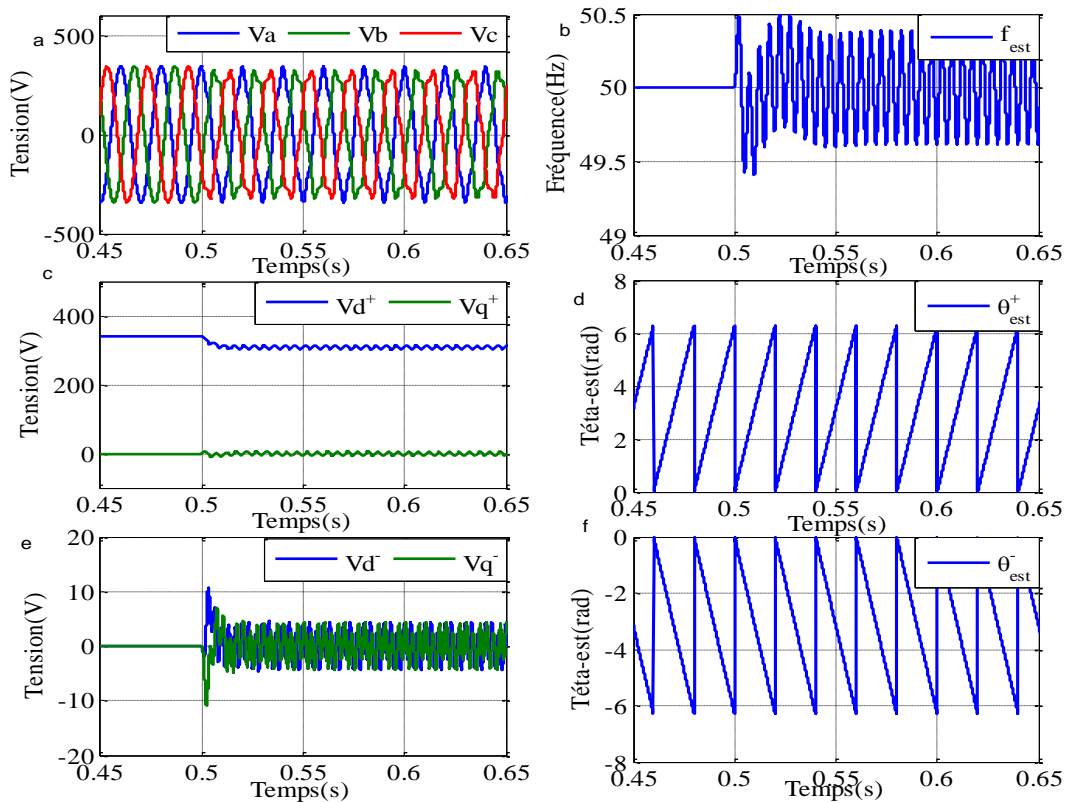


Figure IV.8.1 : Performances de SOGI_PLL pour une présence d'harmonique 5 dans un réseau électrique, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives **directes et en quadrature** V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

- Injection d'harmonique du rang 7

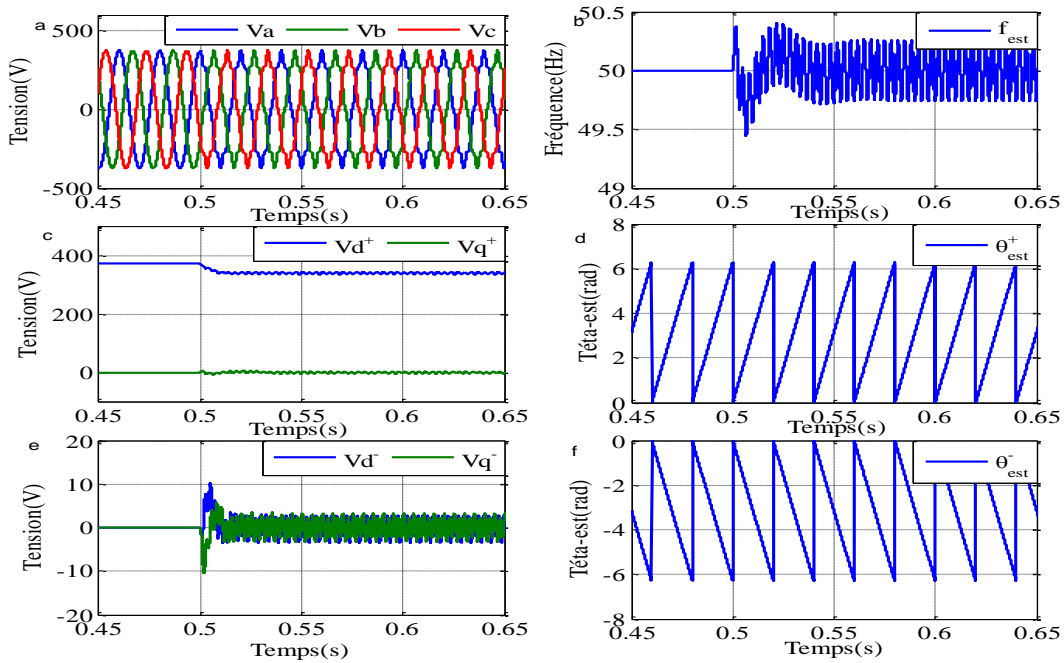


Figure IV.8.2 : Performances de SOGI_PLL pour une présence d'harmonique 7 dans un réseau électrique triphasé, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

- Injection d'harmoniques 5 et 7

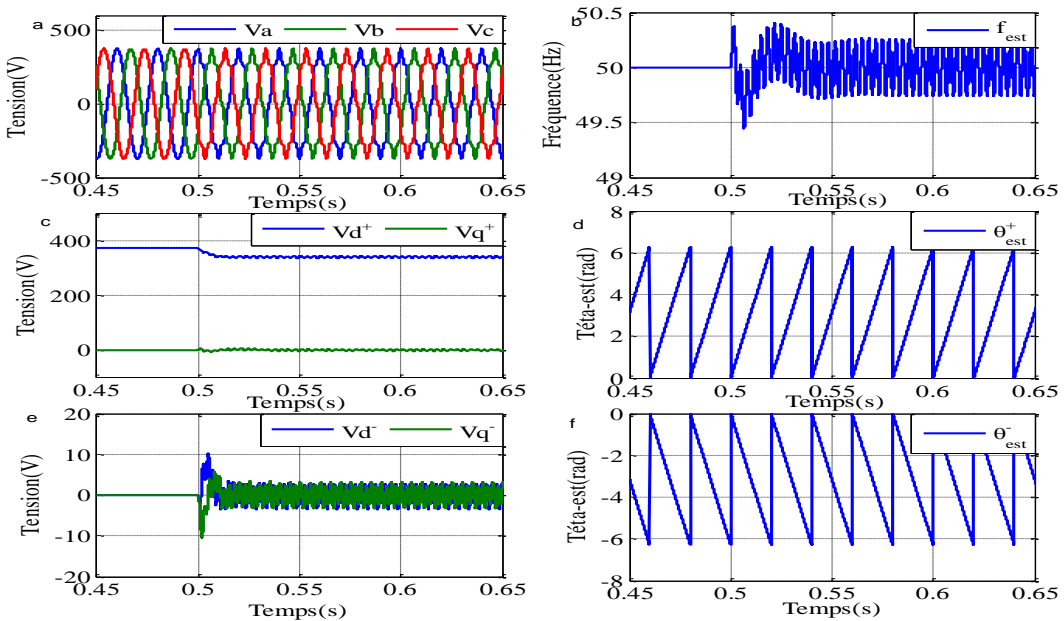


Figure IV.8.3 : Performances de SOGI_PLL pour une présence d'harmonique 5 et 7 dans un réseau électrique triphasé, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.7.8. Injection d'un saut de phase

Dans cet essai, on a injecté le saut de phase a $t=0.2s$, Cela est présenté dans la figure IV.42 et les sous-figures a, b, c, d, e, f affichent les tensions fournies par cette PLL ($V_d^+, V_q^+; V_d^-, V_q^-$), la fréquence estimée, la phase instantanée estimée et les tensions du réseau. Ce qui nous permet de mieux comprendre comment la SOGI-PLL agit face au saut de phase.

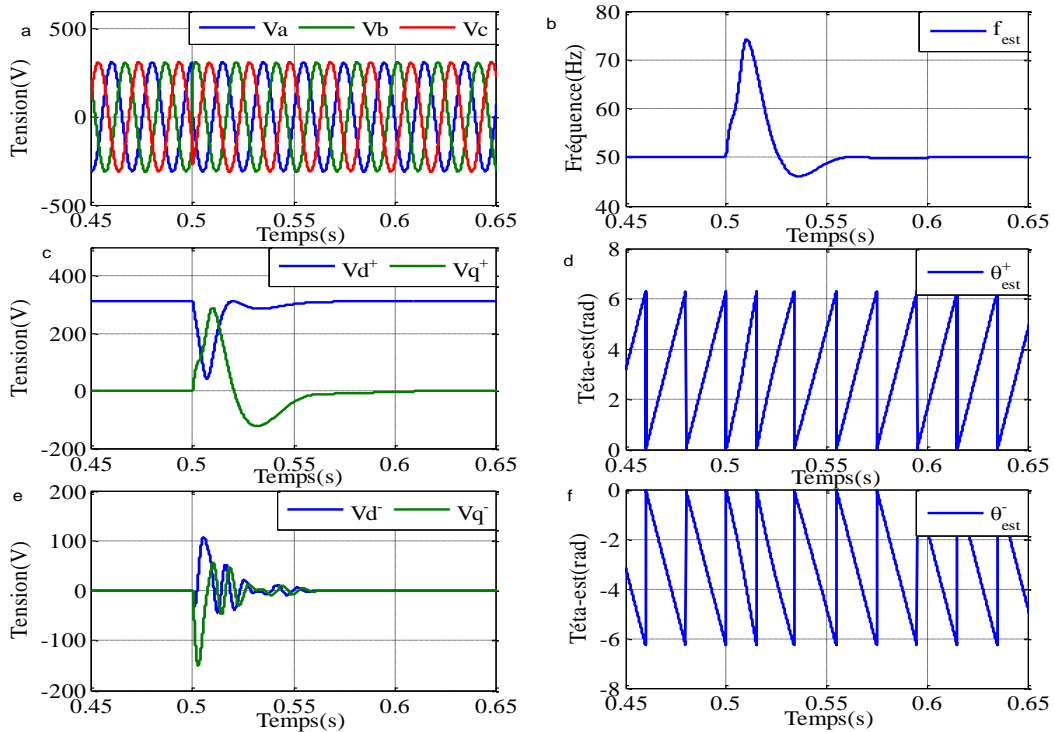


Figure IV.9 : Performances de SOGI_PLL pour une présence d'un saut phase dans un réseau électrique triphasé, (a) tensions du réseau, (b) fréquence estimée f_{est} , (c) composantes positives directes et en quadrature V_d^+ et V_q^+ ; (d) phase instantanée estimée positive θ_{est}^+ (e) composantes négatives directes et en quadrature V_d^- et V_q^- , (f) phase instantanée estimée négative θ_{est}^- .

IV.8 Discussion des résultats

Réseau idéal

Le système SOGI-PLL examiné dans les conditions idéales, ainsi que les paramètres choisis pour le régulateur PI et le gain du SOGI ($K=\sqrt{2}$), semblent appropriés et assurent un fonctionnement, une régulation et un contrôle efficaces, générant ainsi des résultats satisfaisants tout comme les techniques de synchronisation précédentes.

Chute symétrique triphasée

D'après la figure (IV.4), nous observons que suite à l'application d'une chute symétrique de tension à $t = 0.2s$, les tensions (V_d^+, V_q^+), la fréquence estimée et la phase instantanée estimée ne présentent pas d'oscillations par rapport aux résultats obtenus dans la partie précédente dans ce chapitre cela est dû au filtre SOGI.

Chute biphasée et monophasée

En comparant aux résultats de la partie précédente, nous constatons que les tensions résultantes et la fréquence estimée ne présentent pas d'oscillations. De plus, nous observons que l'angle de la phase instantanée positive est correctement estimé, on n'enregistre aucune présence d'oscillations.

Le résultat présenté dans les figures (IV.5) et (IV.6) est clairement amélioré par rapport à la première partie de ce chapitre ce qui est attribuable au SOGI-PLL.

Déviaton de fréquence

D'après les figures (IV.7.1) et (IV.7.2), nous avons remarqué que les résultats obtenus sont améliorés par rapport à ceux de la première partie de ce chapitre, en ce qui concerne la fréquence estimée les tensions V_d et V_q on enregistre une diminution importante des oscillations jusqu'à ce que les signaux se stabilisent et les phases instantanées estimées positives et négatives n'oscillent pas.

Cependant, nous remarquons qu'au moment de la perturbation (figure IV.7.1 et figure IV.7.2), lorsque la fréquence augmente ou diminue, cette déviation se produit de manière légèrement plus rapide par rapport aux résultats obtenus dans la première partie de ce chapitre (variation de la fréquence en fonction du temps), et cela est dû à la robustesse du SOGI face à ce défaut.

Présence d'harmoniques

Lors de la présence des harmoniques du 5e et du 7e rang, on peut voir que les résultats sont améliorés par rapport à ceux de la première partie de ce chapitre. En d'autres termes, au moment de l'application de la perturbation ($t = 0.5s$), les formes d'onde des tensions résultantes à la sortie de la PLL, la fréquence estimée et la phase instantanée estimée ne n'oscillent pas comme présenter dans les figures (IV.8.1) ; (IV.8.2) ; (IV.8.3).

Saut de phase

Dans le cas d'injection d'un saut de phase, les résultats obtenus (figure IV.9) sont les mêmes avec les résultats de chapitre précédent et la première partie de ce chapitre.

IV.9 Conclusion

Ce chapitre décrit l'implémentation de la méthode de la boucle à verrouillage de phase basée sur un intégrateur généralisé de second ordre (SOGI-PLL). Bien que cette méthode offre des avantages grâce à l'utilisation de filtre à ordre supérieur et à une architecture de boucle de rétroaction sophistiquée qui permet une meilleure précision et une réponse dynamique améliorée, elle présente également plusieurs inconvénients tel que la sensibilité accrue aux variations de paramètres et une nécessité de réglage plus fin pour optimiser dans performances dans certains essais et aussi sa sensibilité de rejeter les harmoniques.

Cette méthode est beaucoup plus performante que celles des chapitres derniers, mais les résultats restent toujours moins satisfaisants dans certains cas de présence de défauts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons explorer les techniques de synchronisation d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique, en analysant leur efficacité en conditions idéales ainsi que face à divers défauts comme les chutes de tension triphasées, biphasées, et monophasées, les défauts harmoniques et les déviations de fréquence.

La PLL classique est une technique bien établie pour la synchronisation en conditions normales. Elle montre des faiblesses significatives en présence de chutes de tension biphasées et monophasées, ainsi que face aux défauts harmoniques, ce qui limite son efficacité dans des cas réels de perturbations du réseau.

La PLL Basée sur la Théorie des Signaux Retardés améliore la robustesse face aux défauts de déséquilibre biphasés et monophasés et prouve sa capacité à les gérer. Malgré ces améliorations, elle présente encore des limitations dans certaines conditions, notamment lorsqu'elle est confrontée à des harmoniques.

La technologie SOGI-PLL a démontré des capacités améliorées pour la gestion des déséquilibres et des défauts harmoniques. Bien qu'elle réduise considérablement les effets des harmoniques, elle ne parvient pas à les éliminer totalement.

Cette analyse des différentes techniques de synchronisation met en lumière que si les méthodes classiques comme la PLL offrent une bonne performance en conditions idéales, elles sont insuffisantes face aux perturbations courantes du réseau électrique. Les approches plus avancées, telles que la PLL basée sur la théorie des signaux retardés et le SOGI-PLL, présentent des améliorations notables. Cependant, même ces techniques avancées ne sont pas parfaites et ne parviennent pas à éliminer complètement les effets des défauts harmoniques.

Pour améliorer encore la synchronisation des sources d'énergie renouvelable au réseau électrique, les futures recherches pourraient se concentrer sur :

- L'intégration de méthodes de contrôle adaptatif pour répondre dynamiquement aux conditions changeantes du réseau.
- Amélioration des performances et des stratégies proposées par la méthode du SOGI-PLL face au retard que prend le système pour se stabiliser.

Références bibliographique

Référence

- [1] : BELHAOUCHET Nourri «*Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées*» Application : Amélioration de la Qualité del'Energie, thèse de Doctorat en Sciences Option : Machines Electriques et leurs Commandes Université FerhatAbbas – Sétif, 2011.
- [2] : Alali Mohamed AlaaEdin, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux Eletriques*», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002.
- [3].A.Rahoui, Techniques avancés pour la commande et l'observation d'un redresseur MLI, these de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Algérie, 2017.
- [4] I. Bandyopadhyay, P. Purkait, and C. Koley, —Performance of a classifier based on time-domain features for incipient fault detection in inverter drives, || IEEE Trans. Ind. Informat.,
- [5]]A. E.Mejdoubi, H. Chaoui, J. Sabor, and H. Gualous, —Remaining useful life prognosis of supercapacitors under temperature and voltage aging conditions, || IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 5, pp. 4357–4367, May 2018.
- [6] Boucle à phase asservie – Wikipédia.
- [7] A. K. Jindal, A. Ghosh, and A. Joshi, —The protection of sensitive loads from inter harmonic currents using shunt/series active filters, || Electric Power Systems Research, vol. 73, no. 2, pp. 187–196, 2005.

[8] : Yamina Belkacemi « Etude de la synchronisation de sources d'énergie renouvelable à un réseau électrique perturbé », Mémoire de fin d'étude Master Académique, Université Mouloud Mammeri, 2019.

[9] : TALBI Asma«Évaluation de l'influence de la présence des harmoniques sur la qualité de l'énergieélectrique dans les noeuds à charge non-linéaire du réseau électrique», Mémoire de Magister, Université deBatna, 2013.

[10] : S. TADJER, i.habi«problematiques et identification des perturbations harmoniques dans un reseau basse tension», Laboratoire de la recherche sur l'électrification des entreprises industrielles Faculté des Hydrocarbureset de la chimie-Université M'Hamed Bougara.

[11] M.A.E. ALALI, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.

[12] A.Rennane et D. Saheb – Koussa« Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l'interconnexion d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique », *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2 (2014) 227 – 243 227* .

[13] F. Tao.Zhan, A. Liu, andA.Y. C.Nee, —Digital twin in industry: Stateof- the-art,|| IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019.

[14] Badja Hamid, Moussa Aissaoui«Evaluation de performances d'une boucle à verrouillage de phase triphasée», Mémoire de fin d'étude de Master Professionnel, Université Mouloud Mammeri, 2016.

[15] C. L. Fortescue, "Method of symmetricalcoordinatesapplied to the solution ofpolyphase networks," *Trans. AIEE*, vol. 37, no. II, pp. 1027–1140, 1918.

[16] F. Meinguet, «Fault-tolerant permanent-magnet synchronous machine drives- Faultdetection and isolation, control reconfiguration and design considerations, » Thèse doctorat, Université Libre de Bruxelles 2012.

[17] Rodriguez, P., Pou, J., Bergas, J., Candela, J. I., Burgos, R.P. and Boroyevich, D., Remus Teodorescu «Multiresonant Frequency-Locked Loop for GridSynchronization of Power Converters UnderDistortedGrid Conditions». IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 1, JANUARY 2011.

[18] M. Ciobotaru, R. Teodorescu et F. Blaabjerg, « Une nouvelle structure PLL monophaséebasée sur un intégrateurgénéralisé du second ordre », dans Proc. PESC Conf., Rhodes, juin 2006.

[19] P. Rodríguez, R. Teodorescu, I. Candela, AV Timbus, M. Liserre et F. Blaabjerg, « Nouveau détecteur de tension directe pour la synchronisation au réseau des convertisseurs de puissance dans des conditions de réseau défectueuses », dans Proc. Conférence PESC, Jeju, 2006.

[20] M. Boyra et J. Thomas, « Une revue des méthodes de synchronisation pour les VSC triphasésconnectés au réseau dans des conditions déséquilibrées et déformées », dans Proc. Conférence EPE, Birmingham, 2011.

[21]https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://imperia.com/doc/implementation/sogi-pll&ved=2ahUKEwiwypnt2q6GAxXth_0HHY8LB08QFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw01weNxqvjcwY7YcFTxsB8L.

Résumé : La synchronisation des sources d'énergie renouvelables au réseau électrique est un processus complexe qui requiert une technologie d'avenir avancée. Sa réussite est cruciale pour garantir un avenir énergétique durable.

Un réseau électrique est exposé à des perturbations potentielles qui peuvent gravement affecter la qualité d'alimentation et la stabilité du réseau, rendant la synchronisation des sources d'énergie renouvelables un défi majeur. Pour ce faire plusieurs méthodes ont été mises en œuvre et comparées.

La boucle à verrouillage de phase (PLL) classique est une méthode de base, utilise un oscillateur contrôlé en tension pour maintenir une phase constante entre le signal de sortie et le signal d'entrée. Bien que simple à implémenter, elle est moins efficace en présence de perturbations complexes. Une seconde technique, la PLL basé sur la théorie des signaux retardés, améliore la robustesse de la synchronisation en retardant le signal d'entrée pour filtrer les perturbations, ce qui permet de mieux gérer les déviations de fréquence et les sauts de phase.

Enfin, la PLL basé sur un intégrateur généralisé de second ordre (SOGI-PLL) utilise un intégrateur généralisé pour améliorer la réjection des harmoniques et la stabilité en présence de perturbations complexes.

Les résultats des simulations et expérimentations montrent que chaque méthode présente des avantages spécifiques selon le type de perturbation. La PLL traditionnelle est simple mais moins efficace pour les perturbations complexes, tandis que la PLL basé sur la théorie des signaux retardés offre une meilleure performance contre les déviations de fréquence et les sauts de phase. Le SOGI-PLL se distingue par sa capacité à filtrer les harmoniques et à maintenir la stabilité même dans des conditions de réseau fortement perturbées.

Mots clés : Boucle à verrouillage de phase, SOGI-PLL, Réseau déséquilibré.

Abstracts : Synchronising renewable energy sources to the electricity grid is a complex process that requires advanced future-proof technology. Its success is crucial to ensuring a sustainable energy future.

An electricity network is exposed to potential disturbances that can seriously affect power quality and network stability, making the synchronisation of renewable sources a major challenge. To this end, several methods have been implemented and compared. The classic phase-locked loop (PLL) is a basic method, using a voltage-controlled oscillator to maintain a constant phase between the output signal and the input signal. Although simple to implement, it is less effective in the presence of complex disturbances. A second technique, PLL based on the theory of delayed signals, improves the robustness of the synchronisation by delaying the input signal to filter out disturbances, which makes it possible to better manage frequency deviations and phase jumps.

Finally, PLL based on a second-order generalised integrator (SOGI-PLL) uses a generalised integrator to improve harmonic rejection and stability in the presence of complex disturbances. The results of simulations and experiments show that each method has specific advantages depending on the type of disturbance.

Traditional PLL is simple but less effective for complex disturbances, while PLL based on the theory of delayed signals offers better performance against frequency deviations and phase jumps. SOGI-PLL stands out for its ability to filter harmonics and maintain stability even in highly disturbed network conditions.