

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Electrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

Détection de défauts dans les convertisseurs polyphasés

Réalisé par :

- **CHACHOUA Warda**
- **BAZIZ Imane**

Devant le Jury composé de :

Mr A.YAHIOU

Mme Z.AIT SAADI

Mr A.BOUZIDA

Président

Examinatrice

Encadrant

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu de m'avoir donné la santé et la patience pour achever ce modeste travail.

J'adresse mes profonds remerciements pour mon encadrant M. AHCEN BOUZIDA d'avoir accepté de diriger ce travail, et de nous avoir soutenu tout au long de notre projet de fin d'études Master2 par la qualité de ses remarques et conseils.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Et je remercie toute personne ayant contribué à la réalisation de ce mémoire de près ou de loin.

Dédicaces

Avec mes sentiments de gratitude les plus profonds, empreints d'amour, de respect et de reconnaissance, je dédie ce modeste travail

À ma mère Houria, l'origine même de ma réussite, dont l'amour, le soutien et les sacrifices consentis ont tracé chaque étape de mon chemin.

À mon père Moussa, dont je suis fier et qui trouve ici le résultat de nombreuses années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Que ce travail puisse témoigner des fruits de ses efforts inlassables.

À mes deux frères Amar et Aissa et ma sœur Soulaf, sources infinies de tendresse, pour leur encouragement et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Je vous aime profondément.

À ma collègue Imane, pour le chemin que nous avons parcouru ensemble.

À toutes mes amies, pour les moments de joie et de peine partagés

Cette dédicace reflète l'importance de chacune de ces personnes dans mon parcours académique et personnel.

Warda.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui ont souffert sans me laisser souffrir et qui n'ont jamais dit non à mes exigences et qui n'ont épargné aucun effort pour faire de moi celle que je suis aujourd'hui.

A ma très chère grand-mère qui était toujours présente pour moi dès mon jeune âge.

A mes chers petits frères et sœurs Djaouad et Cerine. A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.

Je tiens à remercier ma copine Nouri Kahina pour son professionnalisme et son dévouement tout au long de cette recherche.

Enfin, Sans oublier mon binôme Warda pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Imane

Table des matières

ملخص.....	13
Résumé.....	13
Abstract.....	14
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1: Généralités sur les convertisseurs et les défauts d'un onduleur	
1. Introduction.....	4
2. Convertisseurs statiques.....	4
2.1 Convertisseur alternatif -continu.....	5
2.2 Convertisseur continu-continu.....	5
2.3 Convertisseur alternatif -alternatif.....	5
2.4 Convertisseur continu-alternatif.....	6
3. Classification des onduleurs.....	6
3.1 Onduleurs non autonomes.....	6
3.2 Onduleurs autonomes.....	7
3.2.a Onduleurs de tensions.....	7
3.2.b Onduleurs de courants.....	8
3.3 Onduleurs à résonance.....	8
4. Types d'onduleurs autonomes de tension.....	9
5. Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasée.....	10
6. Application des onduleurs.....	12
6.1 Quelques applications de l'onduleur.....	13
7. Semi-conducteurs utilisés dans les onduleurs.....	15
8.1 Diode.....	15
8.2 Thyristor.....	16
8.3 Transistor.....	16
8.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	17
9. Défauts dans un onduleur.....	18
10. Défauts des interrupteurs de puissance.....	18
10.1 Défauts dans l'interrupteur GTO.....	18
10.2 Défauts d'un interrupteur IGBT (l'onduleur).....	18
10.2.a : court-circuit.....	18
10.2.b : Circuit ouvert.....	20
10.2.C : vieillissement.....	20
11. Conclusion.....	21

Chapitre 2: Techniques de diagnostic des défauts dans l'onduleur triphasé

1. Introduction.....	23
2. Stratégies de commande d'un onduleur de tension.....	23
2.1 Commande par modulation sinus triangle.....	24
3. Objectifs de la technique MLI.....	25
4. Présentation des méthodes de diagnostic des onduleurs.....	26
4.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs, quantitatifs.....	27
4.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle et sans modèle.....	27
5. Classification des méthodes de diagnostic.....	28
5.a Méthodes internes.....	28
5.b Méthodes externes.....	28
5.c Méthodes inductives.....	29
5.d Méthodes déductives.....	29
5.e Traitement signal	29
6. Analyse de défauts des onduleurs par la transformation de Park.....	29
6.1 Analyse de défauts des onduleurs par la transformation de Concordia.....	32
6.1.a Analyse de la trajectoire du vecteur de courant.....	33
6.1.b Diagnostic des pannes.....	36
7. Conclusion.....	39

Chapitre 3: Analyses des onduleurs triphasés en présence de défauts

1. Introduction.....	41
2. Définition des onduleurs multi-niveaux	41
3. Effets de l'ouverture d'un IGBT sur les performances d'onduleur.....	42
4. Étude de défauts de circuits ouverts dans l'onduleur à deux niveaux par la trajectoire du vecteur de Park.....	43
4.1 Analyse de la trajectoire du vecteur de Park	45
4.2. Étude de défauts de circuits ouverts dans l'Onduleur à multiniveaux par la trajectoire du vecteur de Park.....	48
4.3 Analyse de la trajectoire du vecteur de Park	51
5. Classification des défauts OC par la loi de probabilité à plusieurs variables.....	53
5.1 Loi de probabilité à plusieurs variables.....	53
5.2. Applications en Diagnostic Électrotechnique.....	55
5.3 Application de la méthode au diagnostic de l'onduleur	57
5.4 Choix des variables (points de références).....	57
6. Conclusion :.....	63

Conclusion Générale.....	65
Références Bibliographiques.....	67

Liste des figures

Figure 1. 1: familles des convertisseurs statiques.	4
Figure 1. 2: La conversion AC-DC.	5
Figure 1. 3: La conversion DC-DC	5
Figure 1. 4: La conversion AC-AC	6
Figure 1. 5: La conversion DC-AC.	6
Figure 1. 6: Schéma d'un onduleur autonome	7
Figure 1. 7: Onduleur de tension en pont monophasé.....	8
Figure 1. 8: Onduleur de courant en pont monophasé.	8
Figure 1. 9: Onduleur à résonance série.....	9
Figure 1. 10: l'onduleur monophasé en pont.	9
Figure 1. 11: : Structure générale d'un onduleur triphasé	10
Figure 1. 12: Schéma du principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé	11
Figure 1. 13: Schéma de fonctionnement des onduleurs à fréquence fixe.....	12
Figure 1. 14: Onduleur a tension variable.	12
Figure 1. 15: Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.	13
Figure 1. 16: Alimentation de secours.	13
Figure 1. 17: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	14
Figure 1. 18: Filtre actifs en série avec un filtre passif parallèle.	14
Figure 1. 19: Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive.	15
Figure 1. 20: Caractéristique d'une Diode.	16
Figure 1. 21: Caractéristique d'un thyristor	16
Figure 1. 22: Symboles de transistors bipolaires	17
Figure 1. 23: Représentation schématique d'un MOS	17
Figure 1. 24: Représentation de l'IGBT	18
Figure 1. 25: Court -circuit dans un interrupteur	19
Figure 1. 26: Défaut d'un interrupteur	20
Figure 2. 1: Structure de base d'un onduleur de tension triphasé.	23
Figure 2. 2: Les différentes techniques de commande.....	24
Figure 2. 3: Principe de la MLI triangulo-sinusoidale.	25
Figure 2. 4: Présentation des méthodes de diagnostic.....	27
Figure 2. 5: Structure d'un système de diagnostic à base d'un modèle.	28

Figure 2. 6: Structure d'un système de diagnostic orienté données.....	28
Figure 2.7: Schémas de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	30
Figure 3.1: Schéma de la commande MLI d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	43
Figure 3.2: Tension et courants de l'onduleur.....	44
Figure 3.3 : Les courants de sortie de l'onduleur en présence de défaut dans les IGBTs.....	45
Figure 3.4: Trajectoire vecteur de Park.....	46
Figure 3.5: La trajectoire de vecteur de Park pour l'état sain et en présence de défaut dans les IGBTs.....	47
Figure 3.6: Structure d'un onduleur de tension à trois niveaux	48
La figure 3.7 : courant et tension de l'onduleur pour le cas sans défauts.	50
Figure 3.8 : Les courants à la sortie de l'onduleur à l'état sain et en présence de défaut dans.	50
Figure 3.9: La trajectoire de vecteur de Park à l'état sain et en présence de défaut dans les IGBTs.....	52
Figure 3.10 : La probabilité à plusieurs variables.	56
Figure 3.11: Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à deux niveaux	58
Figure 3.12: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour un onduleur sain	59
Figure 3.13: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.2$	60
Figure 3.14: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.1$	60
Figure 3.15: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.01$	60
Figure 3.16: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.8$ (Onduleur à trois niveaux).....	61
Figure 3.17: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.4$ (Onduleur à trois niveaux).....	62
Figure 3.18: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.2$ (Onduleur à trois niveaux).....	62
Figure 3.19: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.05$ (Onduleur à trois niveaux).....	63

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à deux niveaux.....	58
Tableau 3.2: Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à trois niveaux.....	59

Liste des abréviations

AC	Alternative Current (Courant alternative).
DC	Direct Current (courant continue).
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Transistor à grille à effet de champs à semi – conducteur en Oxyde de métal).
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolé)
GTO	Gate turn off thyristor.
N	Point neutre
O	Point milieu
BJT	Transistor bipolaire
T	La Période
A	Anode
K	Cathode
G	Gâchette
MOS	Métal Oxyde Semi-conducator
D	Le Drain
S	La source
G	La grille
V	La tension
φ	Le flux
ω	La pulsation
Ψ	la pente de la trajectoire moyenne du courant
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
PWM	Pulse Width Modulation
SVM	modulation vectorielle de l'espace
SPT	La modulation sinus-triangle

PSIM SimPowerSystems.

CC Court-circuit

CO Circuit ouvert

ملخص

ككل عملية صناعية، قد يتعرض المحول الثابت لمختلف الأعطال أثناء تشغيله، مما يقلل من قدرته على الإنتاج. لتمكين التشخيص الدقيق، من الضروري كشف وتحديد أعطال الدوائر المفتوحة في المحول الثابت. في هذه الدراسة، نركز على كشف أعطال فتح IGBT في المحولات متعددة الأطوار. الهدف هو تحديد مواقع الأعطال لضمان استمرارية العملية. لتحقيق ذلك، استخدمنا محول ثلاثي الأطوار بمستويين وثلاثة أطوار يتحكم في عرض النبضات (PWM) وتطبيقاتها لكشف الأعطال باستخدام البرمجيات (Sim power system) مع التركيز على أعطال الدوائر المفتوحة لدراسة عمله. تُعد الطرق المعتبرة مثل مسارات فيكتور بارك والمسارات المحصل عليها، والتي سُنِّصت بعد ذلك باستخدام طريقة تعتمد على قانون احتمالات متعددة المتغيرات.

الكلمات المفتاحية: تشخيص محول، عطل، دائرة مفتوحة، محاكاة، ترانزستور ثنائي القطب معزول البوابة. MLI.PSIM.

Résumé

Comme tout processus industriel, le convertisseur statique peut connaître, lors de son fonctionnement, divers défauts et anomalies qui réduisent la capacité de production. Pour permettre un diagnostic précis, il est essentiel de détecter et localiser les défauts de circuit ouvert dans le convertisseur. Dans cette étude, nous nous concentrons sur la détection de défauts de l'ouverture de l'IGBT dans les onduleurs polyphasés. L'objectif est de localiser les défauts pour assurer la continuité du fonctionnement, Pour cela, nous avons utilisé un onduleur triphasé à deux et trois niveaux à commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI) et de leurs applications pour la détection de défauts sous logiciel (Sim power system) en mettant en évidence les défauts de circuit ouvert pour étudier son fonctionnement. Principalement, les méthodes considérées à savoir :la transformer de Park et la trajectoire de vecteur de Park et les trajectoires obtenues seront ensuite classifiées par une méthode basée sur la loi de probabilités à plusieurs variables.

Mots clés : Diagnostic, Onduleur, Défaut, Circuit Ouvert, Park, IGBT, PSIM, MLI

Abstract

As any industrial process, the static converter can experience various faults and anomalies during operation that reduce production capacity. To enable accurate diagnosis, it is essential to detect and locate open circuit faults in the converter. In this study, we focus on the detection of IGBT open circuit faults in polyphase inverters. The aim is to locate faults to ensure continuity of operation. To do this, we used a three-phase inverter with two and three levels of pulse width modulation (PWM) control and their applications for software fault detection (Sim power system) by highlighting open circuit faults to study its operation. The main methods considered are the Park transform and the Park vector trajectory, and the trajectories obtained will then be classified using a multivariate probability law method.

Keywords: Diagnostics, Inverter, Fault, , Open circuit, Park, IGBT, PSIM, PWM

Introduction générale

Introduction Générale

Les convertisseurs statiques polyphasés sont une technologie essentielle dans le domaine de l'électrotechnique pour convertir l'énergie électrique de manière efficace dans différentes applications industrielles. La distribution et le contrôle de l'électricité sont rendus possibles grâce à ces systèmes, qui offrent une souplesse et une efficacité inégalées dans la gestion des réseaux électriques [1].

Les composants essentiels de l'électronique de puissance sont présents au cœur de ces convertisseurs statiques, tels que les condensateurs, les IGBT (Transistors Bipolaires à Grille Isolée), les GTO (Gate Turn-Off Thyristors), les MOSFET (Transistors à Effet de Champ à Grille Métal-Oxyde), et bien d'autres encore [2]. Grâce à ces éléments, associés à des configurations de convertisseurs spécifiques, il est possible de convertir l'énergie électrique de manière bidirectionnelle avec un contrôle et une précision élevée.

Les convertisseurs polyphasés impliquent plusieurs phases de courant et de tension, ce qui les rend plus complexes que leurs homologues monophasés. Cette complexité accrue augmente également la diversité des défauts potentiels susceptibles de survenir. Ces défauts peuvent être causés par des défaillances internes des composants, des surcharges, des courts-circuits, des perturbations externes ou des conditions de fonctionnement anormales.

Avec les progrès continus dans les technologies de semi-conducteurs et les techniques de contrôle avancées, de nouvelles méthodes émergent constamment pour améliorer la fiabilité et la réactivité des systèmes de détection de défauts. Ces innovations visent à réduire les temps d'arrêt, à prolonger la durée de vie des équipements et à améliorer la sécurité globale des installations électriques modernes.

La détection de défauts dans les convertisseurs polyphasés revêt une importance capitale pour assurer leur fonctionnement fiable et sécurisé dans diverses applications industrielles et commerciales. Ces convertisseurs, en particulier les onduleurs polyphasés, transforment le courant continu en courant alternatif polyphasé, indispensable pour alimenter des systèmes de transmission d'énergie, des moteurs électriques et d'autres charges critiques [3]. L'objectif est d'optimiser la fiabilité des onduleurs en identifiant et en traitant rapidement les anomalies, assurant ainsi un fonctionnement stable des onduleurs.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous explorerons l'électronique de puissance et ses composants fondamentaux. Nous examinerons le rôle crucial des interrupteurs de puissance dans la conversion continu-alternatif de l'énergie électrique, ainsi que les

caractéristiques et les applications des principaux dispositifs semi-conducteurs utilisés dans les convertisseurs statiques polyphasés. Cette compréhension approfondie de l'électronique de puissance jettera les bases nécessaires pour une analyse approfondie des convertisseurs statiques dans les chapitres suivants. En outre, nous examinerons les défauts potentiels qui peuvent survenir dans les systèmes d'onduleurs.

Le deuxième chapitre de ce mémoire explore en détail la commande MLI et ses diverses configurations. Il met en lumière les différentes approches de MLI et leurs objectifs. Le chapitre se concentre ensuite sur les méthodes de diagnostic des défauts, en particulier la transformation de Park, qui est essentielle pour la détection et l'identification des anomalies dans les onduleurs. Ces méthodes permettent de localiser précisément les défauts et d'identifier leurs signatures fréquentielles, facilitant ainsi leur détection précoce et leur diagnostic précis.

Enfin, le troisième chapitre se penchera sur la simulation des onduleurs multiniveaux (deux et trois niveaux) sur le logiciel PSIM, dans des cas sains et en présence de défauts d'ouvertures de circuits (IGBT ouvert). Une analyse des résultats de simulation des onduleurs à deux et trois niveaux sera réalisée en utilisant le suivi de la trajectoire du vecteur de Park. Les trajectoires obtenues seront ensuite classifiées par une méthode basée sur la loi de probabilités à plusieurs variables, permettant de localiser le composant en défaut.

Chapitre 1 : Généralités sur les convertisseurs et les défauts d'un onduleur

1. Introduction

La branche de l'ingénierie électrique appelée électronique de puissance se focalise sur la transformation, le contrôle et la gestion optimale de l'énergie électrique. L'importance de cette discipline est cruciale dans de multiples secteurs, tels que les systèmes d'alimentation électrique, les applications industrielles, les énergies renouvelables et les véhicules électriques. Les convertisseurs statiques sont au cœur de l'électronique de puissance, permettant de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre de manière régulée. Il est crucial d'avoir ces convertisseurs afin de régler la tension, le courant et la fréquence de l'électricité en fonction des exigences particulières des charges électriques ou des sources d'alimentation [4].

Nous examinerons dans ce premier chapitre les principes fondamentaux de l'électronique de puissance, les diverses catégories de convertisseurs statiques, ainsi que leurs utilisations, leur importance dans les systèmes d'alimentation électrique et les diverses formes de défauts.

2. Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un dispositif qui permet de modifier la source d'énergie électrique en la transformant pour alimenter un récepteur spécifique. Ces appareils jouent un rôle crucial dans le secteur industriel en optimisant la conversion d'énergie. Les convertisseurs sont classés en fonction du mode de conversion, comme le montre la figure ci-dessous [5] :

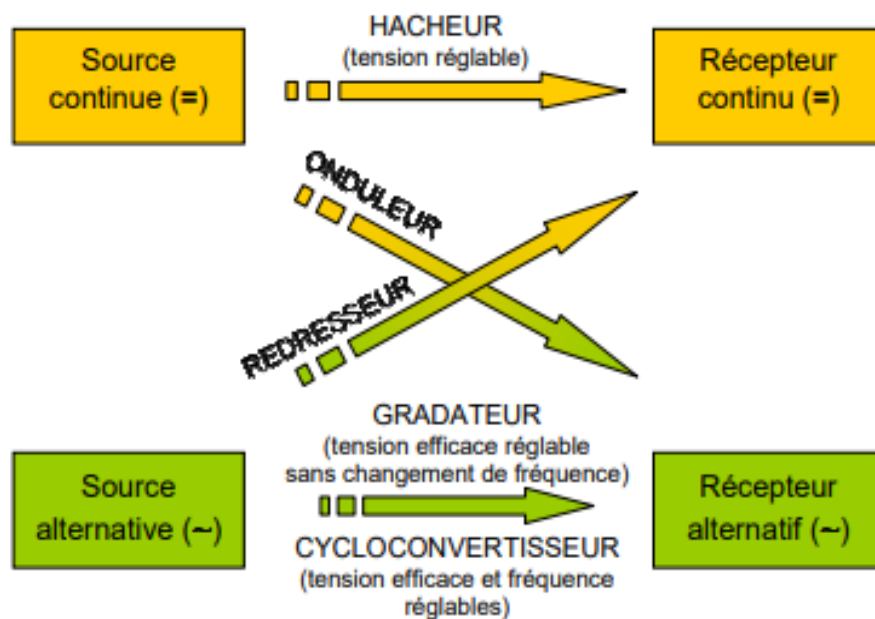


Figure 1. 1: familles des convertisseurs statiques.

2.1 Convertisseur alternatif -continu

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif-continu ou pont de Graetz, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite une tension et un courant aussi continus que possible, à partir d'une source de tension alternative.

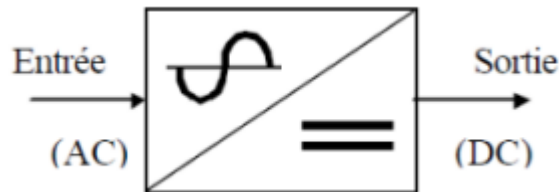


Figure 1. 2: La conversion AC-DC.

2.2 Convertisseur continu-continu

Un hacheur, ou convertisseur continu-continu, est un appareil électronique de puissance qui permet de contrôler la valeur moyenne d'une tension continue à partir d'une source de tension continue déjà existante.

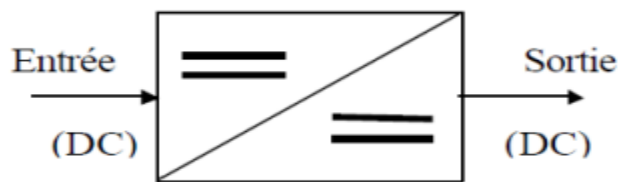


Figure 1. 3: La conversion DC-DC

2.3 Convertisseur alternatif -alternatif

Un gradateur, ou convertisseur alternatif-alternatif, ou AC-AC, est un appareil électronique qui permet de changer la fréquence ou l'amplitude d'un signal alternatif sans le transformer en un signal continu. À la différence des convertisseurs alternatif-continu, qui convertissent le courant alternatif en courant continu, les convertisseurs AC-AC conservent la nature alternative du courant tout au long de la conversion.



Figure 1. 4: La conversion AC-AC

2.4 Convertisseur continu-alternatif

Les onduleurs sont des dispositifs électroniques développés dans le but de convertir le courant continu (DC) en courant alternatif. Grâce à cette conversion, il est possible de fournir du courant alternatif à des équipements en utilisant une source de courant continu, telle qu'une batterie ou un panneau solaire. Ils jouent un rôle crucial dans l'incorporation de systèmes d'énergie renouvelable, comme les installations solaires, dans le réseau électrique ou dans la fourniture d'une alimentation rapide.

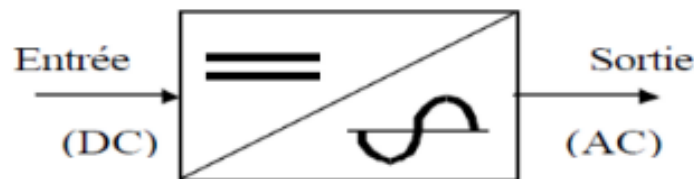


Figure 1. 5: La conversion DC-AC.

Les onduleurs sont principalement employés dans deux domaines principaux : Fournir une tension ou un courant alternatif avec une fréquence et une amplitude réglable pour réguler la vitesse des moteurs asynchrones et d'autres appareils. Garantir une alimentation continue en une ou plusieurs tensions alternatives, avec une fréquence et une amplitude stable, notamment dans le cadre des alimentations de secours généralement alimentées par des batteries.

3. Classification des onduleurs

Les onduleurs peuvent d'abord être classés en deux catégories : les onduleurs non autonomes et les onduleurs autonomes. Parmi ces deux catégories, il y a aussi une classe intermédiaire d'onduleurs appelée onduleurs à commutation par la charge, parfois onduleurs à résonance [6].

3.1 Onduleurs non autonomes

Si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif, un onduleur est considéré comme non autonome. Il en va de même pour le

fonctionnement des onduleurs de réduction. Le réseau alternatif impose la fréquence et la forme d'onde de la tension [7].

3.2 Onduleurs autonomes

Les spécifications du générateur et du récepteur entre lesquels il est installé sont étroitement liées à l'onduleur autonome. Selon ces caractéristiques, il est possible d'identifier les commutations et les semi-conducteurs adéquats à utiliser. Il est nécessaire que ces semi-conducteurs soient des éléments à commutation bidirectionnelle, capables de s'ouvrir et de se refermer. Notons que ce genre d'onduleur n'est pas réversible, c'est-à-dire qu'il ne peut pas transformer le courant alternatif en courant continu. Un onduleur autonome a une relation étroite avec les caractéristiques du générateur et du récepteur auquel il est connecté, ce qui entraîne une différence cruciale [8].

- Les transformateurs de tension
- Les transformateurs de courant.

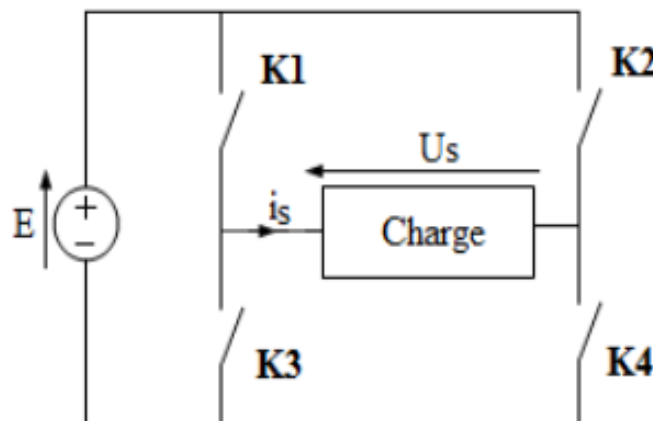


Figure 1. 6: Schéma d'un onduleur autonome

3.2.a Onduleurs de tensions

Une source de tension continue alimente un onduleur de tension (dont l'impédance interne est très faible). Les fluctuations du courant « i » qui traverse l'onduleur ne modifient pas la tension « u » à l'entrée de l'onduleur, et donc à sa sortie. La tension à l'entrée de l'onduleur est imposée par la source continue, ce qui entraîne une tension à sa sortie. La charge placée du côté alternatif influence le courant en sortie « i' » et donc le courant en entrée « i ». Il est possible d'utiliser n'importe quelle charge, à condition qu'elle ne soit pas

reliée directement à une autre source de tension (comme une capacité ou une force électromotrice alternative) entre les bornes de sortie. [5,9].

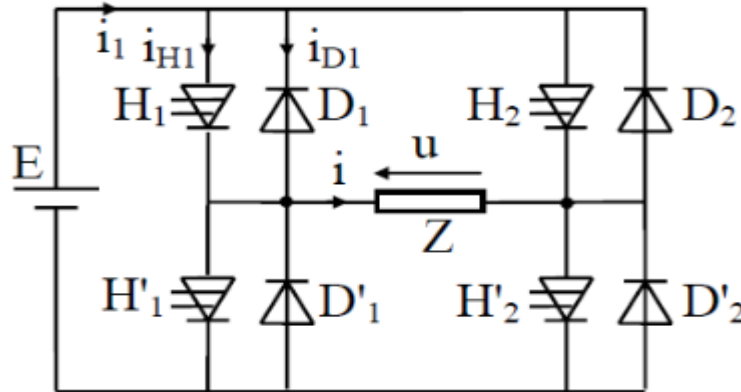


Figure 1. 7: Onduleur de tension en pont monophasé

3.2.b Onduleurs de courants

Une source de courant continu alimente un onduleur de courant (souvent désigné comme un commutateur de courant), c'est-à-dire une source d'inductance interne telle que le courant « i » qui le traverse ne peut être affecté par les fluctuations de la tension « u » à ses bornes [5,9].

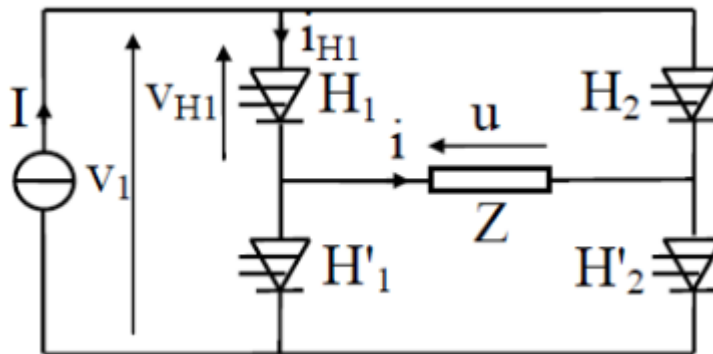


Figure 1. 8: Onduleur de courant en pont monophasé.

3.3 Onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance désignent des onduleurs de tension ou de courant qui sont utilisés en alternance dans des conditions spécifiques. Il est nécessaire que le circuit oscillant soit peu amorti. Les interrupteurs sont commandés avec une fréquence proche de la fréquence de résonance de la charge. Lorsque celle-ci fluctue, il est nécessaire de modifier la fréquence de commande. Il est nécessaire que l'onduleur soit piloté par la charge, car il n'est plus autonome. [5,9].

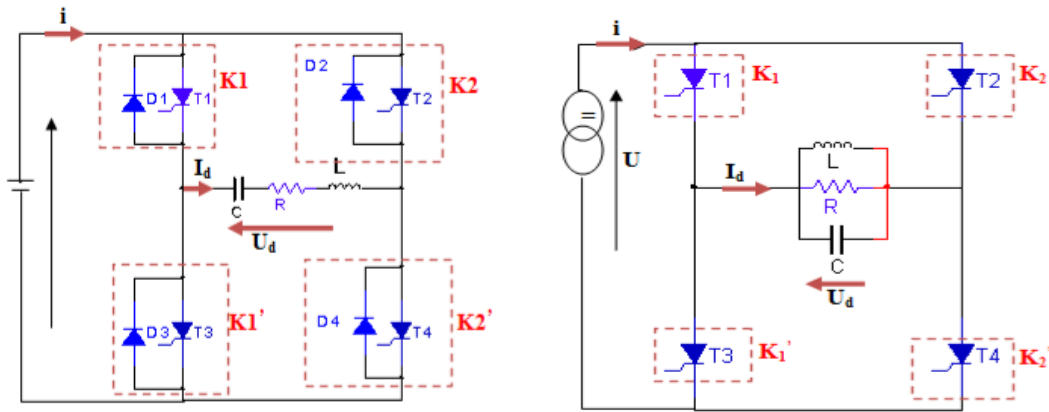


Figure 1. 9: a) Onduleur à résonance série

b) Onduleur à résonance parallèle

4. Types d'onduleurs autonomes de tension

❖ Onduleurs monophasés

Afin d'obtenir une tension alternative en utilisant deux interrupteurs, il est nécessaire de trouver un point milieu, que ce soit du côté de la sortie alternative ou de l'entrée continue, ce qui correspond à : Il existe deux types d'onduleurs monophasés : l'onduleur push-pull avec transformateur de sortie à point milieu et l'onduleur en demi-point avec diviseur capacitif à l'entrée.

Il est nécessaire d'avoir quatre interrupteurs pour modifier la largeur relative des créneaux qui forment les alternances de la tension de sortie [10].

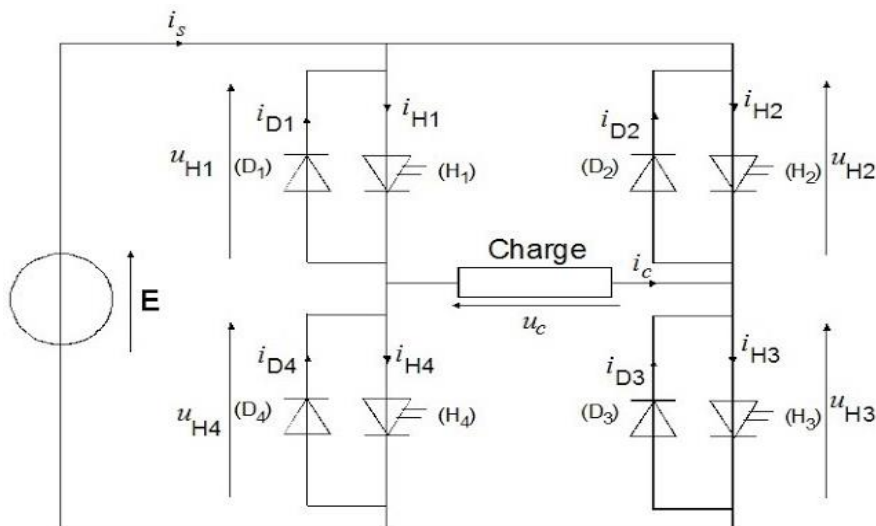


Figure 1. 10: l'onduleur monophasé en pont.

❖ Onduleurs triphasés

On peut fabriquer un onduleur triphasé en utilisant trois onduleurs monophasés (pont ou demi-point) en parallèle et en réglant les interrupteurs de chacun afin d'obtenir à la sortie trois phases décalées de 120° . En combinant trois demi-points monophasés, un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs est obtenu, comme le montre la figure (1.11). Il est nécessaire de compenser les interrupteurs du même bras de l'onduleur afin d'éviter tout court-circuit de la tension continue U et de s'assurer que les circuits des courants a_i, b_i et c_i ne soient jamais indisponibles. Il est nécessaire que les interrupteurs soient bidirectionnels en courant pour pouvoir imposer les tensions de sortie, peu importe les charges en courant. Chacun d'entre eux est composé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée opposée. Il est possible de fabriquer ces interrupteurs en utilisant des transistors MOS ou bipolaires, des IGBT ou des GTO, ainsi qu'une diode en antiparallèle afin d'obtenir la réversibilité en courant [11].

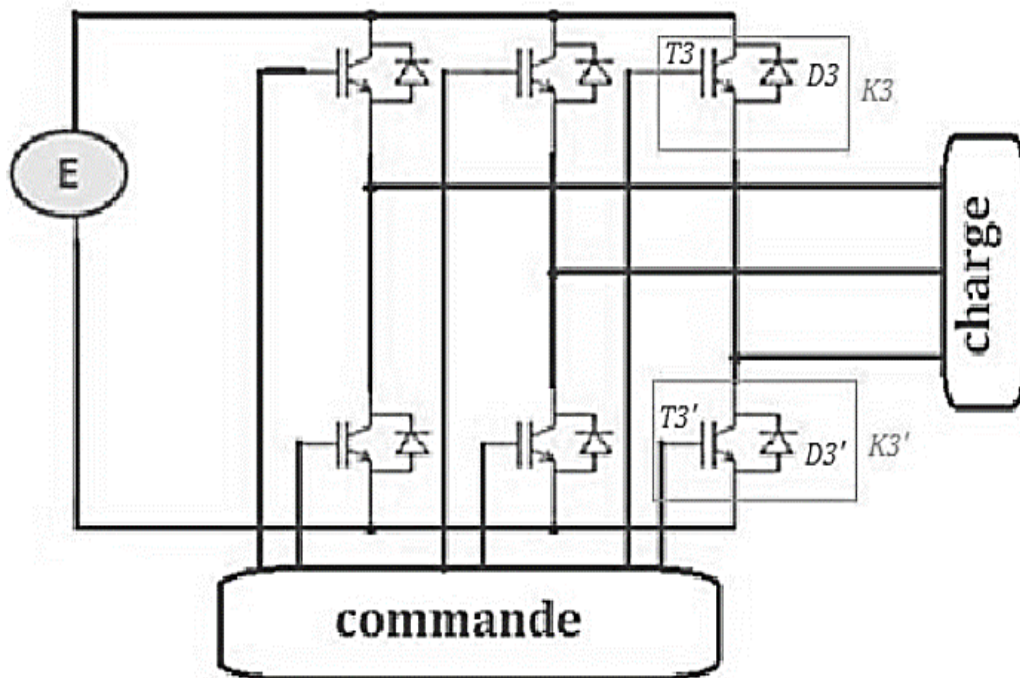


Figure 1. 11: Structure générale d'un onduleur triphasé.

5. Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé

La schématique de l'onduleur est présentée dans la figure ci-dessous. Les interrupteurs sont complémentaires deux à deux pour garantir la continuité du courant de sortie alternative

i_a, i_b et i_c et les tensions de sortie v_a, v_b et v_c sont identiques à un tiers de la période T . Chaque demi-point doit être commandé avec un retard de $T/3$ par rapport à son principe. L'onduleur triphasé peut être commandé de la façon suivante :

- Chaque interrupteur conduit durant « $2*\pi/3$ ».
- Chaque interrupteur conduit durant « π ».

En commande pleine onde on ferme donc :

K_1 Pour $\omega t = 0$ et K'_1 pour $\omega t = \pi$.

K_2 Pour $\omega t = 2\pi/3$ et K'_2 pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$.

K_3 Pour $\omega t = 4\pi/3$ et K'_3 pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$.

Il est indispensable que le neutre soit connecté à la source lorsque le récepteur est déséquilibré, surtout s'il est constitué de charges monophasées reliées entre la phase et le neutre.

D'autre part, en équilibrant le récepteur triphasé (par exemple, un moteur triphasé), la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « O » de la source peut être supprimée. La suppression de cette liaison permet d'obtenir l'onduleur triphasé en lui-même [12].

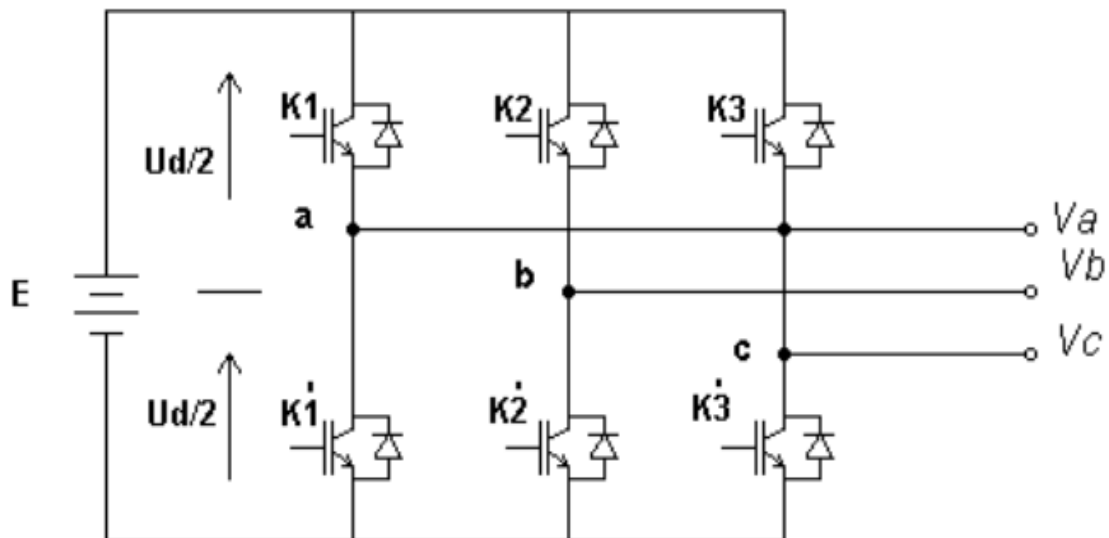


Figure 1. 12: Schéma du principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé.

6. Application des onduleurs

- **Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée :** Souvent alimentés par une batterie d'accumulateur, ils sont généralement utilisés comme alimentation de sécurité et sont ainsi le principe fondamental des onduleurs autonomes [13],[14].

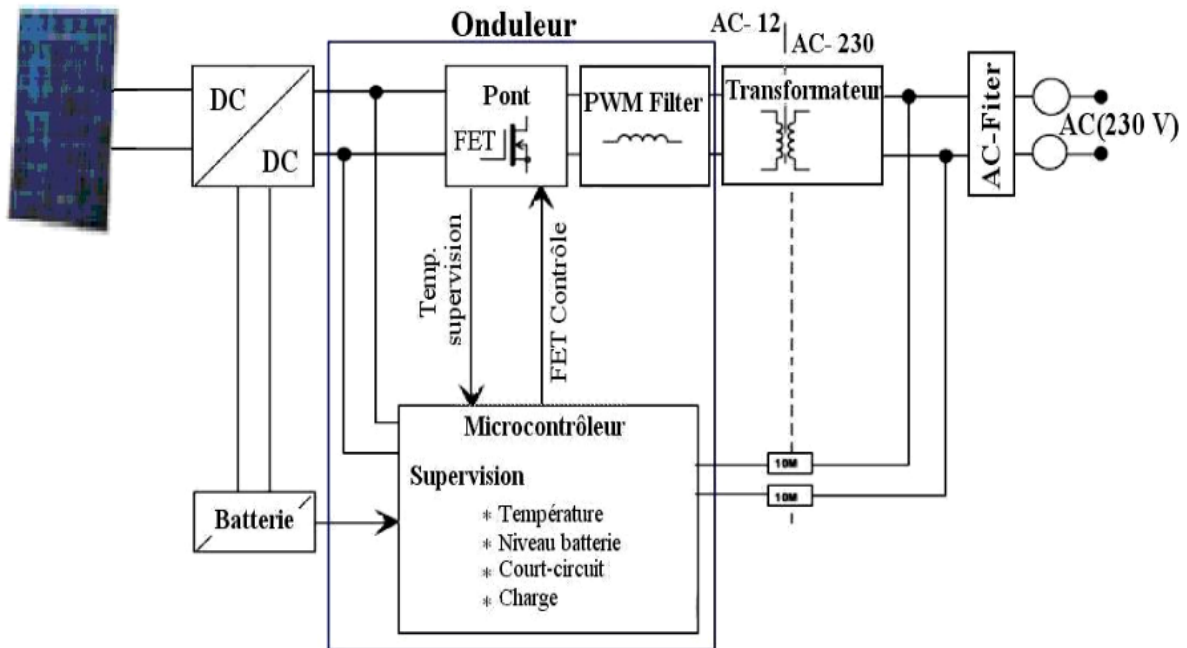


Figure 1. 13: Schéma de fonctionnement des onduleurs à fréquence fixe.

- **Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée :** Alimentés par un montage redresseur provenant du réseau industriel, ils produisent une tension de fréquence et de valeur efficace pour faire fonctionner les moteurs à courant alternatif.

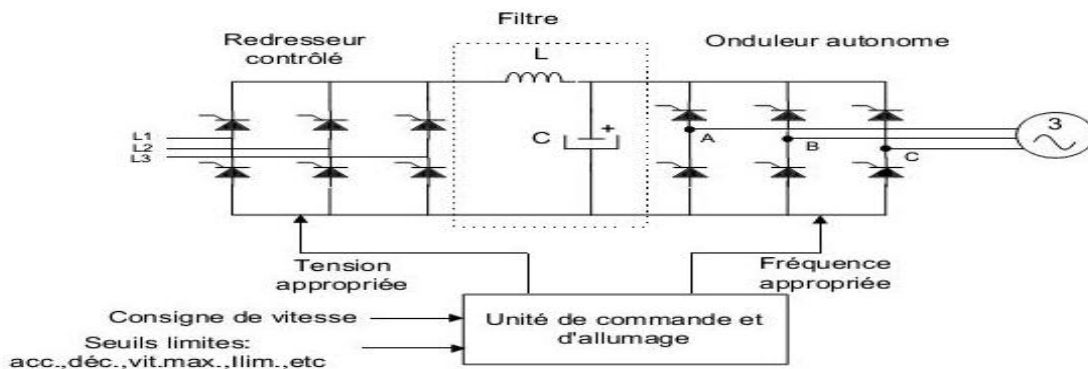


Figure 1. 14: Onduleur a tension variable.

6.1 Quelques applications de l'onduleur

❖ Réglage de la vitesse de rotation des moteurs

La régulation de la vitesse d'un moteur repose sur la pulsation des courants statiques. Afin de modifier la vitesse, il est nécessaire de modifier la fréquence des tensions d'alimentation. Il est essentiel de régler la tension du réseau et de l'onduler à la fréquence souhaitée.

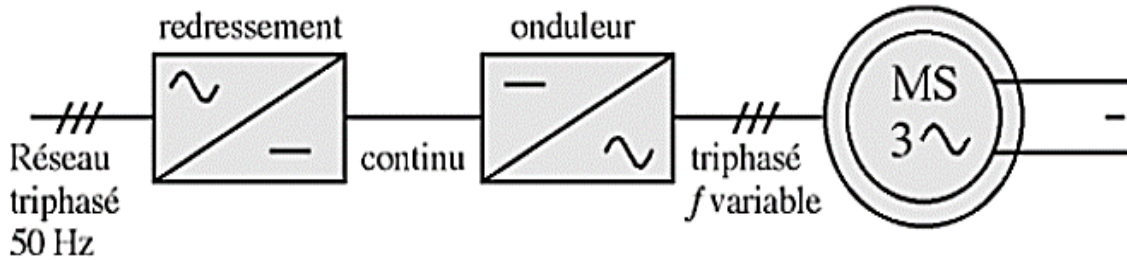


Figure 1. 15: Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

❖ Alimentation de secours

Parmi les autres domaines d'application des onduleurs, la réalisation d'alimentation de sécurité revêt une importance capitale. Certains appareils ne peuvent pas supporter les interruptions d'électricité inévitables, en particulier dans les établissements hospitaliers. Dans le secteur de l'informatique, les ordinateurs ne sont même pas capables de supporter les microcoupures (quelques périodes) qui entraînent des pertes d'informations. Ainsi, lors de coupure de l'électricité, l'onduleur peut garantir la continuité de l'alimentation d'une batterie [15].

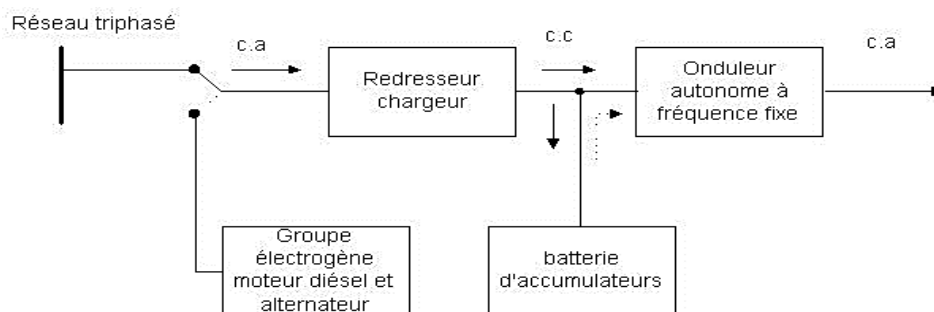


Figure 1. 16: Alimentation de secours.

❖ **Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes**

Dans cette situation, l'emploi d'onduleurs permet de relier deux réseaux de fréquences distincts. En réalité, la France fournit de l'électricité à la Grande-Bretagne, mais le réseau anglais utilise une fréquence de 60 Hz. Il est nécessaire d'ajuster la fréquence en utilisant le billet d'onduleur, comme illustré dans la figure (1.17) [12].

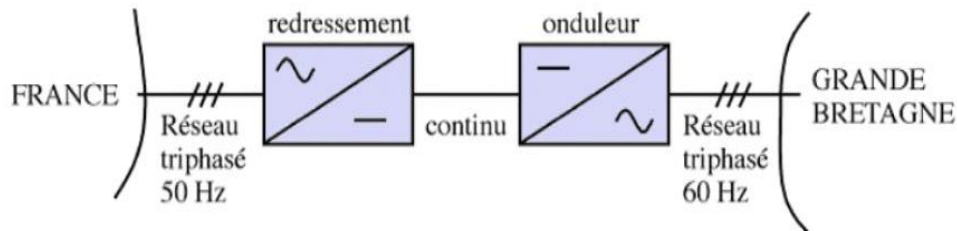


Figure 1.17: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

❖ **Filtres actifs**

Les filtres actifs se constituent d'un onduleur alimenté par une source de courant ou de tension continue. L'onduleur a la capacité de générer un courant ou une tension dont le contenu harmonique est exclusivement déterminé par la loi de commande des interrupteurs. Par conséquent, les filtres actifs jouent le rôle de sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau, ce qui permet de rétablir un courant de source presque sinusoïdal. Il est possible de connecter les filtres actifs au réseau de manière série ou parallèle, en fonction de leur conception visant à compenser les tensions ou les courants harmoniques [16].

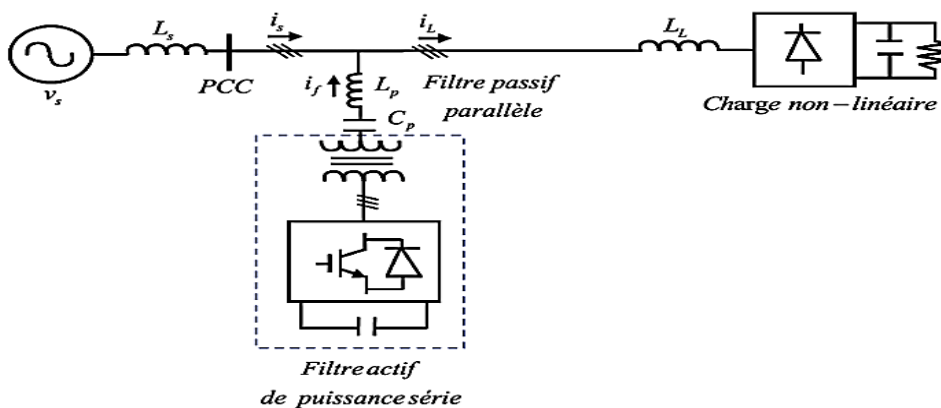


Figure 1. 18: Filtre actifs en série avec un filtre passif parallèle.

❖ Compensateur de puissance réactive

L'onduleur de tension opère en tant que dispositif de réduction de puissance réactive. Le contrôle de la tension de sortie du dispositif V_{out} permet de régler l'énergie réactive. Sa composante fondamentale a une valeur efficace plus élevée que V_r et le courant dans l'inductance L est en retard de 90° par rapport à V_r [17].

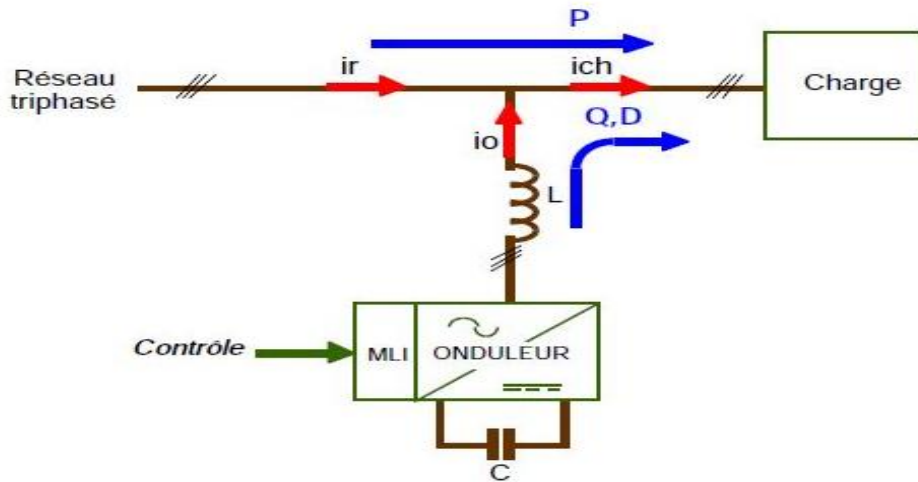


Figure 1. 19: Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive.

7. Semi-conducteurs utilisés dans les onduleurs

Les convertisseurs ont pour principe de commuter les courants entre les différentes boucles adjacentes, ce qui implique l'emploi de composants qui agissent comme des interrupteurs. Une tension presque nulle aux bornes de l'interrupteur est idéale lorsque le courant est déterminé par le reste du circuit lorsque l'interrupteur est fermé. D'autre part, quand il est ouvert, une tension extérieure est appliquée sans qu'il y ait de courant. Des actions de blocage ou d'amorçage peuvent être distinguées, qu'elles soient commandées ou spontanées. Les interrupteurs mécaniques sont des résistances, d'une valeur très faible à l'état fermé et d'une valeur très élevée à l'état ouvert, et ne peuvent fonctionner qu'en commutation [18].

8.1 Diode

Une diode est un élément qui comprend deux électrodes, l'anode A et la cathode K, et qui ne possède pas d'électrode de commande. C'est donc un élément qui fonctionne automatiquement pour démarrer et verrouiller.

- Lorsque le courant se déplace de A vers K, cela indique que la diode est passante ou conductrice [19].



Figure 1. 20: Caractéristique d'une Diode.

8.2 Thyristor

Le thyristor consiste en trois électrodes : l'anode (A), la cathode (K) et l'électrode de contrôle, la gâchette (G). C'est un élément avec un amorçage commandé et un blocage spontané. Lorsque la tension (V) à ses bornes est négative, le thyristor se bloque. Toutefois, lorsque la tension (V) est positive et qu'une impulsion de courant positive est appliquée de la gâchette vers la cathode, le thyristor devient capteur [19].



Figure 1. 21: Caractéristique d'un thyristor [20].

8.3 Transistor

Un transistor est un élément électronique employé dans un circuit afin de réguler un courant ou une tension élevée en utilisant un courant ou une tension faible. Autrement dit, il est capable d'augmenter ou de commuter (redresser) des signaux électriques ou de la puissance, ce qui lui permet d'être employé dans de nombreux appareils électroniques. Ces interrupteurs sont utilisés pour l'amorçage et le blocage. Peut-être :

a. Transistor bipolaire

Ce genre de transistor est l'un des plus fréquents et peut avoir une configuration NPN ou PNP. Les bornes du transistor bipolaire (BJT) sont l'émetteur, la base et le collecteur. En fusionnant les trois couches, il est capable d'augmenter l'ampleur du signal électrique.

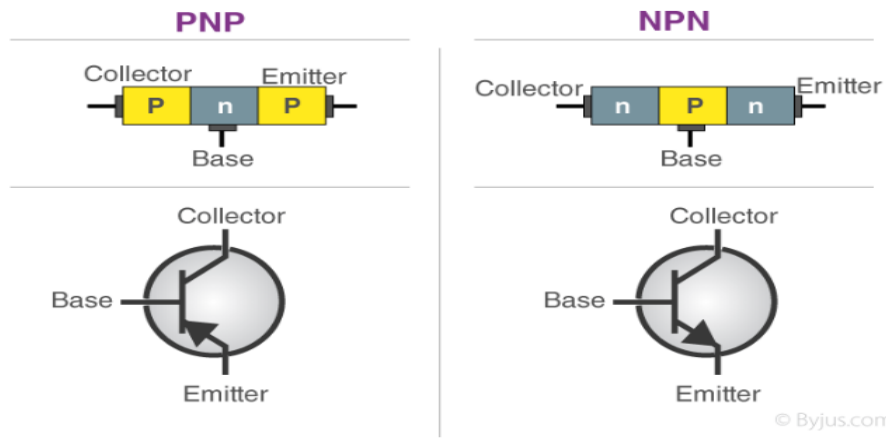


Figure 1. 22: Symboles de transistors bipolaires [20].

b. Transistor MOS (Métal Oxyde Semi-conducator)

Le MOSFET est un transistor à effet de champ, aussi appelé transistor à effet de champ à grille isolée. Trois bornes sont équipées, le Drain D, la Source S et la grille G (une électrode de commande isolée par une couche d'oxyde).

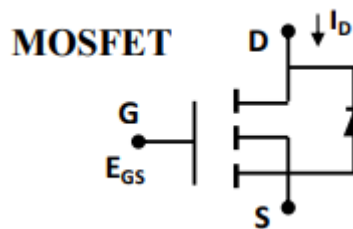


Figure 1. 23: Représentation schématique d'un MOS [21].

8.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

L'IGBT, également connu sous le nom de transistor bipolaire à grille isolée, est un système semi-conducteur de puissance qui combine les caractéristiques des transistors bipolaires (BJT) et des transistors à effet de champ métal-oxyde-semiconducteur (MOSFET). Il agit de la manière suivante :

L'IGBT est un interrupteur électronique à haute efficacité et à commutation rapide. Il peut générer des formes d'onde complexes grâce à la modulation de largeur d'impulsion et aux filtres passe-bas, ce qui le rend très pratique dans les amplificateurs de commutation des systèmes audio et dans les systèmes de contrôle industriel [19].

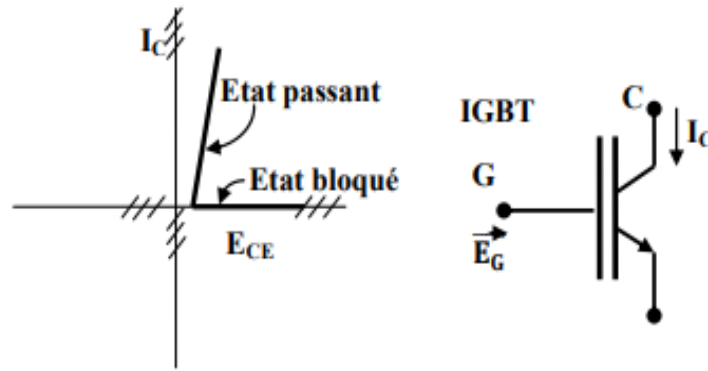


Figure 1. 24: Représentation de l'IGBT [19].

9. Défauts dans un onduleur

La panne de l'onduleur est principalement causée par le défaut des composants de puissance et des commandes à des interrupteurs.

10. Défauts des interrupteurs de puissance

Les thyristors GTO et les IGBT sont principalement employés dans les onduleurs de type tension. Là-bas. La défaillance soudaine d'un élément peut être due à diverses raisons. Toutefois, il s'agit principalement d'un phénomène thermique, qui est responsable directement de la destruction des composants. La température du silicium atteint une valeur critique, ce qui entraîne la perte de ses capacités de semi-conducteur.

10.1 Défauts dans l'interrupteur GTO

- Lorsque la durée du cycle de surintensité ne correspond pas à la Norme de surcharge, cela entraîne des dommages thermiques.
- En cas de blocage : suite à une surtension, il est possible que les composants soient endommagés par une avalanche. Un problème plus sérieux réside dans la température élevée de la GTO. Ces différentes opérations entraînent la fusion du silicium : Effectivité des Thyristors GTO Il représente un dispositif de fermeture parfait

10.2 Défauts d'un interrupteur IGBT (l'onduleur)

Il y a plusieurs défauts qui peuvent être apparaître dans l'onduleur, on essaye d'étudier les plus répandus.

10.2.a : court-circuit

Un court-circuit se produit lorsque l'un des interrupteurs du bras continue de se refermer sans cesse. Deux raisons peuvent expliquer ce genre de panne : soit une petite anomalie. La

puce de silicium (IGBT ou diode) présente des caractéristiques physiques qui dépassent la température critique, voire une panne de la commande connectée [22]. Plus de la moitié sont en échec. Ainsi, les semi-conducteurs utilisent des signaux de commande défectueux ou parasites pour accomplir cette tâche. Une panne de contrôle entraîne une surcharge de courant dans l'un des deux circuits. Un transistor, en fonction du signe et de la valeur du courant. Le défaut se manifestera dans le premier transistor sans protection et pourra se propager à ce dernier transistor. Remplir. Le court-circuit se produit alors dans l'unité de commutation. Dans cette situation Très critique car l'alimentation est donc directement court-circuitée avec unité de commutation. Ce type de panne est extrêmement préjudiciable au convertisseur et nécessite une mise à niveau Mettre en œuvre une protection pour déconnecter immédiatement le bras défaillant si cette situation se produit échouer. Installation d'un disjoncteur électronique rapide intégré au variateur Se rapprocher des composants est une solution possible pour éviter cette situation grave. Cependant, la présence de ce type de protection ne garantit pas la sécurité de l'ensemble du système. Chaîne de transformation. Ainsi, il est indispensable d'isoler deux des trois pôles de la batterie défectueuse afin de garantir la continuité de service en cas de panne interne ou externe du convertisseur. Il est donc nécessaire d'incorporer des dispositifs de sectionnement supplémentaires, tels que des fusibles, des sectionneurs passifs, des sectionneurs mécaniques (disjoncteurs à contacteur) ou des disjoncteurs électroniques pour chaque phase en série avec charge [23].

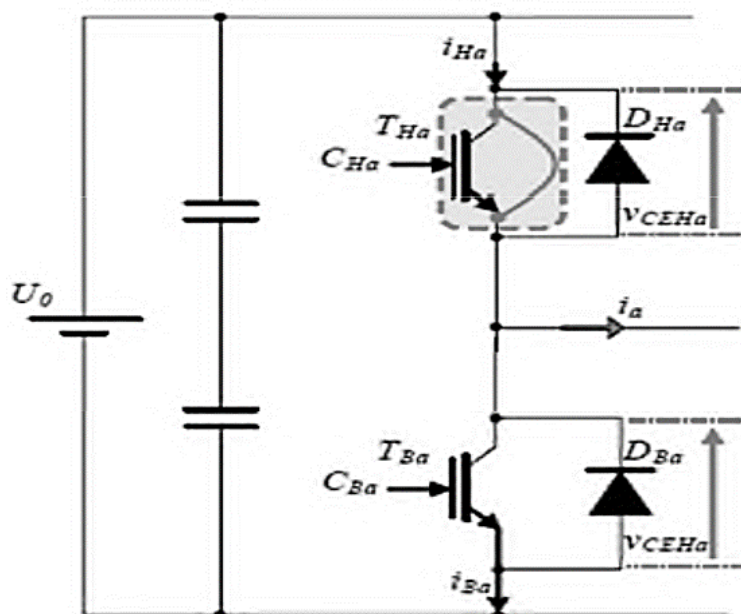


Figure 1. 25: Court -circuit dans un interrupteur [24].

10.2.b : Circuit ouvert

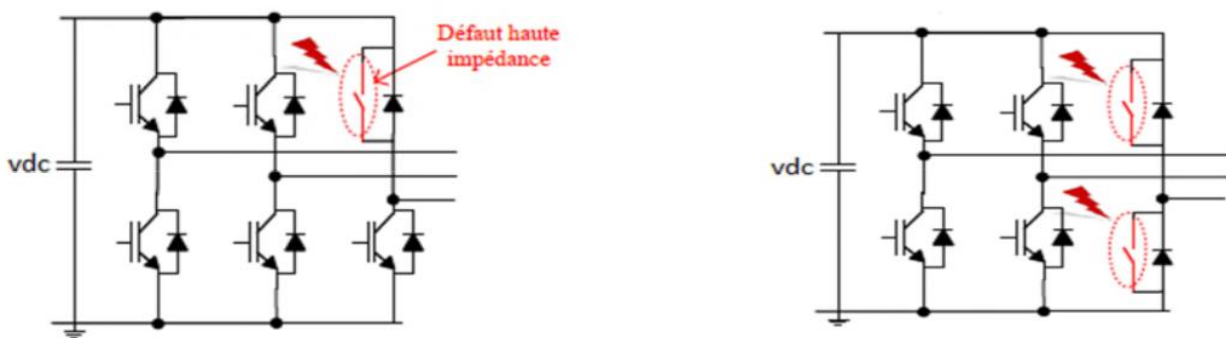
Lorsqu'un des interrupteurs (IGBT) d'un bras reste en permanence ouvert, cela entraîne un défaut de type circuit ouvert. Un problème de contrôle du portail (alimentation, pilote ou portail du composant), y compris son interconnexion, peut entraîner une défaillance de type élevée impédance. Le défaut sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur l'interrupteur supérieur) soit sur l'alternance négative (défaut sur l'interrupteur inférieur).

- Défaillance de type haute impédance sur un transistor (Figure(a)) :

Dans le cas de l'onduleur, cette diminution de la réversibilité entraîne l'absence de variation du courant de phase. La phase est donc reliée au potentiel négatif du bus d'entrée par le biais de la diode du commutateur homologue, lorsque le transistor supérieur de la cellule est ouvert et que le courant dans la phase correspondante est positif. On peut rencontrer cette panne sur l'un ou l'autre des commutateurs de cellules.

- Défaillance de type haute impédance des deux transistors de la cellule (Figure (b)) :

Les courants développés par la cellule filtrante influencent la conduction spontanée d'une des diodes de la cellule défaillante et sont contrôlés par les cellules restantes. Ce mode de défaut implique principalement la perte de contrôle de l'ensemble cellulaire. La cellule de commutation endommagée ne peut être connectée que par le biais des diodes.



(a) Défaillance haute impédance sur un transistor.(b) Défaillance haute impédance sur un bras

Figure 1. 26: Défaut d'un interrupteur [23].

10.2.C : vieillissement

De même que pour les diodes classiques, ce mode de défaut des IGBT est lié à une augmentation de l'impédance thermique, pouvant être causée par :

- Demandes continues (en boucle)
- Défauts au niveau des puces de silicium
- Boîtier non hermétique, permettant à l'humidité de s'infiltrer à l'intérieur (plus ou moins fréquent) et entraînant la corrosion du composant [22].

11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par examiner les caractéristiques générales des convertisseurs statiques, puis nous avons approfondi notre étude sur les onduleurs. Nous avons exploré leur structure, les semi-conducteurs les plus couramment utilisés, leur fonctionnement et leurs principales applications. Nous avons également analysé les différentes configurations des onduleurs et discuté des divers types de défauts pouvant survenir dans ces dispositifs. Une attention particulière a été accordée aux onduleurs de tension, notamment ceux construits en pont triphasé.

Chapitre 2 : Techniques de diagnostic des défauts dans l'onduleur triphasé

1. Introduction

Actuellement, la surveillance de l'état des convertisseurs, tels que les onduleurs, est un domaine de recherche essentiel. Ces convertisseurs sont susceptibles de présenter des défauts structurels, notamment des ouvertures d'interrupteurs à semi-conducteurs. Ces dysfonctionnements peuvent entraîner des dommages au système de production si le personnel n'est pas averti et qu'un arrêt intempestif se produit. Étant donné que les dispositifs de protection n'interviennent qu'au dernier stade des défauts, il est évident que l'investissement dans la détection précoce des dysfonctionnements est une solution incontournable.

Dans ce chapitre, nous aborderons l'onduleur de tension contrôlé par la technique de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Nous explorerons également l'application d'une approche dédiée à la détection et au diagnostic des défauts dans l'onduleur. Cette approche repose sur l'analyse de la trajectoire du vecteur de Park du courant de charge.

2. Stratégies de commande d'un onduleur de tension

Il existe plusieurs méthodes de contrôle des onduleurs qui visent à produire une onde de tension ou de courant de sortie aussi proche que possible de la sinusoïde. La figure (2.1) présente la structure de base de l'onduleur triphasé, les éléments sont représentés par les triangles. Les éléments de puissance sont symbolisés par des interrupteurs en courant bidirectionnel. Le neutre de la charge est le N, tandis que le point milieu de la source DC est le O.

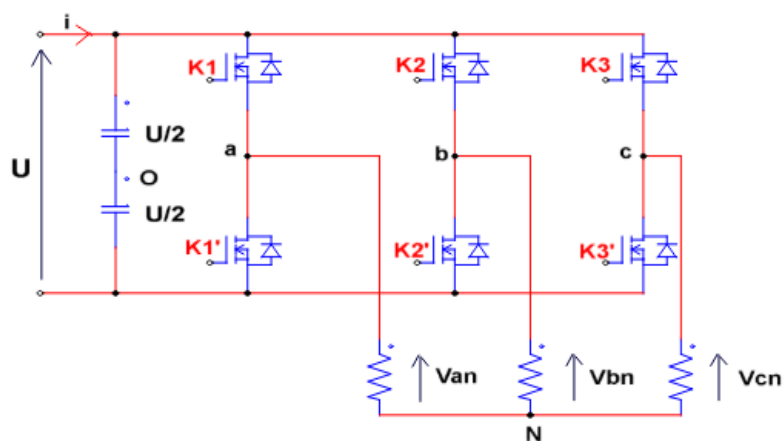


Figure 2. 1: Structure de base d'un onduleur de tension triphasé.

La commande à MLI, (en Anglo saxon Pulse Width Modulation : PWM) Cela nécessite l'utilisation d'une fréquence de commutation plus élevée que celle des grandeurs de sortie, et la création de chaque alternance d'une tension de sortie à partir d'une succession de créneaux de largeur adéquats. S'il y avait plus de commutations, les pertes seraient trop importantes si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chaque commutation [5]. L'emploi de la MLI offre des avantages, en particulier en supprimant les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le coefficient de puissance. Cependant, cette approche ne permet pas de résoudre complètement le problème des harmoniques de courant et c'est un inconvénient. On utilise plusieurs méthodes de modulation de largeur d'impulsion afin de mesurer en temps réel les moments de fermeture et d'ouverture des interrupteurs. La modulation sinus-triangle ainsi que la MLI vectorielle (SVM : modulation vectorielle de l'espace) peuvent être mentionnées [25].

- La modulation sinus-triangle consiste à comparer un signal sinusoïdal à une porteuse généralement triangulaire.
- La modulation vectorielle, également connue sous le nom de MLI régulière symétrique, consiste à calculer les angles de commutation en ligne [26].

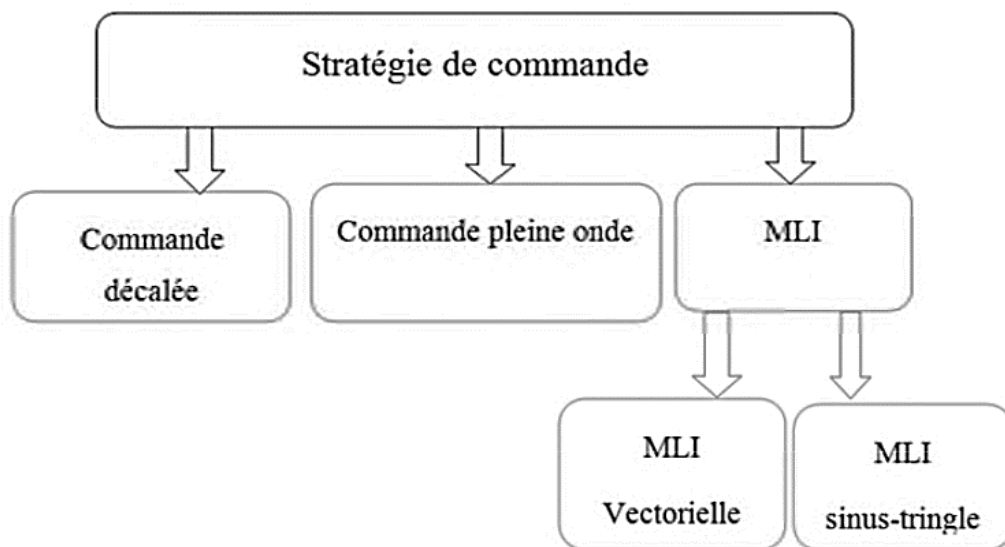


Figure 2. 2: Les différentes techniques de commande.

2.1 Commande par modulation sinus triangle

La modulation sinus-triangle, également connue sous le nom de SPT ou STM, représente une technique de modulation fréquemment employée dans les systèmes

électroniques de puissance pour réguler la puissance transmise à un appareil, typiquement un convertisseur de puissance ou un onduleur.

Dans cette méthode, un signal sinusoïdal (généralement la tension ou le courant de référence) est confronté à un signal triangulaire [22]. Le signal de commande produit est déterminé par la relation entre le signal sinusoïdal et le signal triangulaire. En fonction de cette relation, la durée des impulsions du signal de commande varie, ce qui ajuste la puissance transférée à l'appareil de sortie.

La modulation sinus-triangle est couramment utilisée dans des contextes où une modulation de largeur d'impulsion (PWM) est requise, tels que dans les onduleurs utilisés pour convertir le courant continu en courant alternatif dans les systèmes d'alimentation, les systèmes de variateurs de vitesse, les alimentations à découpage, et d'autres applications similaires.

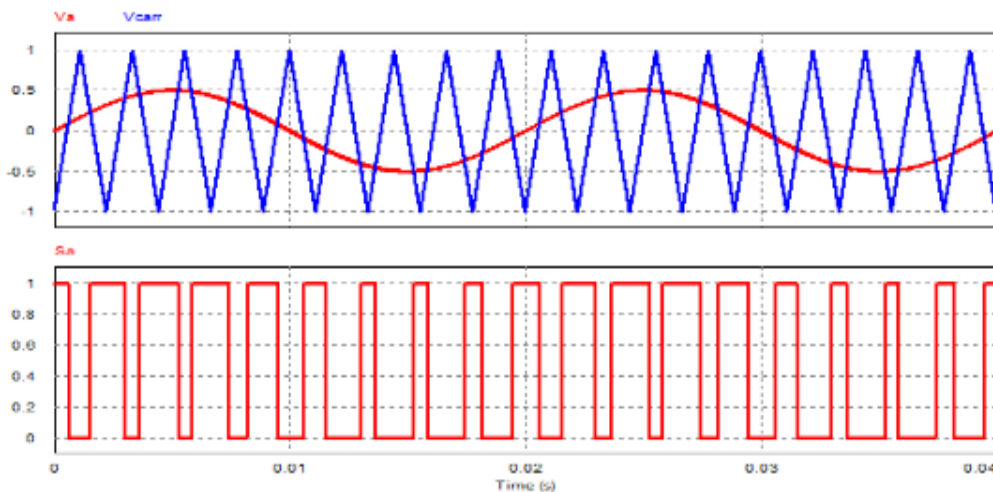


Figure 2. 3: Principe de la MLI triangulo-sinusoidale.

3. Objectifs de la technique MLI

Les objectifs de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) sont variés et se concentrent principalement sur l'amélioration de la qualité de la tension de sortie ainsi que sur la possibilité d'un contrôle précis du convertisseur de puissance. Voici les principaux objectifs de la MLI :

- **Générer des tensions de sortie de forme d'onde désirée :** La MLI cherche à produire des tensions de sortie avec une forme d'onde spécifique, souvent sinusoïdale, à partir d'une source de tension continue. Cela se réalise en ajustant la largeur des

impulsions des signaux de commande des interrupteurs dans le convertisseur de puissance.

- **Réduire les harmoniques et la distorsion de tension** : En modifiant les paramètres de modulation, comme les rapports cycliques des signaux de commande, la MLI peut efficacement diminuer les harmoniques indésirables et la distorsion de tension dans la sortie du convertisseur. Cela assure une meilleure qualité de l'alimentation électrique, cruciale pour de nombreuses applications sensibles.
- **Assurer un contrôle précis de la tension de sortie** : La MLI permet un contrôle précis de la tension de sortie du convertisseur de puissance. En ajustant les paramètres de modulation, il est possible de réguler avec précision la tension de sortie à la valeur souhaitée, même dans des conditions de charge et de tension d'entrée changeantes.
- **S'adapter à différentes fréquences de sortie** : La technique de modulation utilisée dans la MLI peut être ajustée pour fonctionner avec différentes fréquences de sortie, offrant ainsi une flexibilité dans les applications où la fréquence de sortie peut varier.
- **Réduire les pertes de commutation** : En optimisant les schémas de modulation, la MLI peut minimiser les pertes de commutation dans les composants du convertisseur de puissance, améliorant ainsi son efficacité globale.
- **Assurer la compatibilité avec les charges non linéaires** : La MLI est conçue pour être compatible avec diverses charges, y compris les charges non linéaires telles que les moteurs à courant alternatif, les sources d'éclairage à diodes électroluminescentes (LED) et d'autres charges électroniques modernes.

4. Présentation des méthodes de diagnostic des onduleurs

Les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes

- Dans la première situation, on emploie des informations redondantes et la connaissance fournie par le modèle mathématique afin de caractériser le fonctionnement ou l'état du système, puis de déterminer s'il est normal ou anormal [27].
- Dans la seconde situation, c'est l'examen des informations fournies par le système qui permet de déterminer son état. Les automatismes les plus connus des automates sont ceux qui reposent sur l'utilisation de modèles mathématiques. Elles exploitent la répétition des relations entre les différentes variables mesurées, qu'elles soient

statiques ou dynamiques. Les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts seront exposées dans l'étude qui suit. Il s'intéressera principalement aux méthodes basées sur des modèles mathématiques [28].

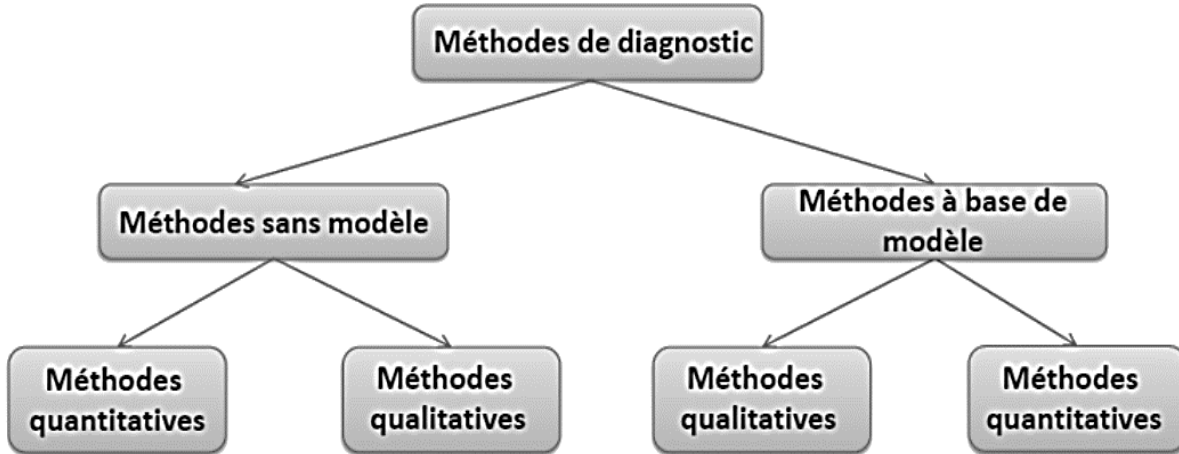


Figure 2. 4: Présentation des méthodes de diagnostic.

4.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs, quantitatifs

Qualitatifs : on peut abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction et ne représentent pas la physique du système, mais sa description en termes de mode de fonctionnement [28].

Quantitatifs : Dans les secondes, on utilise des modèles mathématiques du système pour décrire le comportement du système [29].

4.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle et sans modèle

La comparaison du comportement du système avec celui du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi est essentielle. Par conséquent, toute différence est associée à une défaillance, comme le montrent les schémas des figures 2.5 et 2.6. Il est possible que ces deux catégories d'approches coexistent au sein d'une même méthode de diagnostic [28].

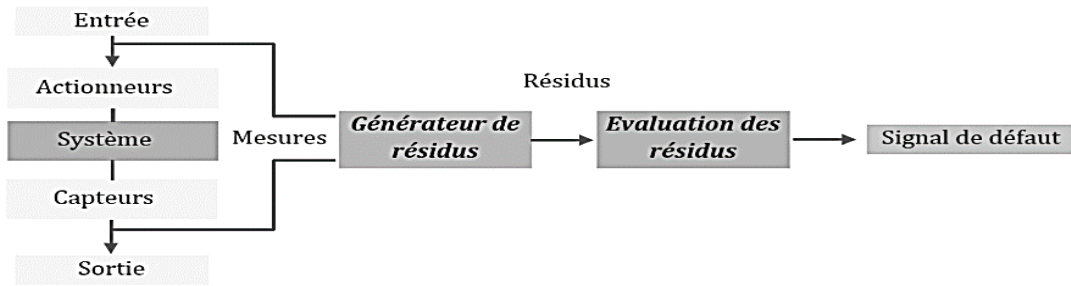


Figure 2. 5: Structure d'un système de diagnostic à base d'un modèle.

De plus, il est essentiel d'utiliser des méthodes de diagnostic sans modèle (diagnostic basé sur les données) ou de se limiter à la disponibilité des données de mesure. Les techniques axées sur les données peuvent inclure : des systèmes spécialisés, des techniques statistiques telles que l'analyse en composantes principales (ACP), la classification, ainsi que des techniques basées sur l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones. Le schéma conceptuel du diagnostic orienté données est présenté dans la figure 2.6 [29].

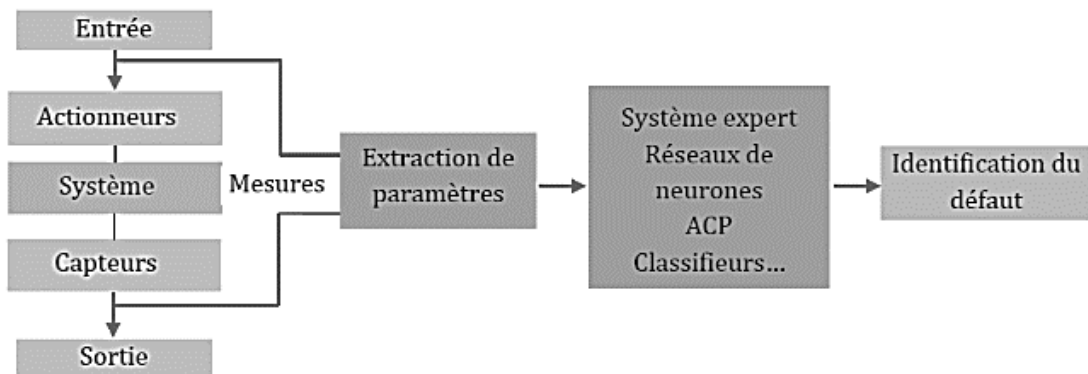


Figure 2. 6: Structure d'un système de diagnostic orienté données.

5. Classification des méthodes de diagnostic

5.a Méthodes internes

Ces approches reposent sur des schémas physiques ou mathématiques vérifiés par les méthodes d'identification de paramètres. Il est envisageable de diagnostiquer une défaillance en observant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou en utilisant des modèles de type « boîte noire ».

5.b Méthodes externes

Ces approches supposent qu'il n'existe aucun modèle pour décrire les relations de cause à effet, que la connaissance repose uniquement sur l'expertise humaine, appuyée par un

solide retour d'expérience, et il s'agit de toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et les approches probabilistes [30].

5.c Méthodes inductives

Ces approches sont celles d'une approche ascendante où l'on cherche à identifier toutes les combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent conduire à la réalisation d'un événement unique indésirable. Autrement dit, il est nécessaire d'interpréter les symptômes ainsi que leurs possibles combinaisons pour déterminer le défaut.

5.d Méthodes déductives

Dans ces méthodes, la procédure est inversée, car on commence par s'inquiéter de l'événement indésirable et on cherche ensuite toutes les causes possibles en utilisant une approche descendante. Une comparaison des effets observés avec les effets potentiels permet de confirmer ou de démentir l'existence du défaut.

5.e Traitement signal

L'analyse et le traitement d'un signal peuvent parfois être bénéfiques dans le domaine du diagnostic. Effectivement, la mesure d'un signal comprend des oscillations qui peuvent être harmoniques, stochastiques ou les deux en même temps. On peut associer la variation de ces signaux aux défauts [27].

6. Analyse de défauts des onduleurs par la transformation de Park

Différentes méthodes sont disponibles pour le diagnostic des défauts et la protection des transistors bipolaires, avec une attention particulière portée à celles utilisées dans les C/S. Il existe vingt et une méthodes pour les défauts de circuit ouvert et dix méthodes pour le court-circuit, basées sur des principes de base. Parmi ces méthodes, on mentionne leurs performances et leurs efforts de mise en œuvre [31].

On utilise fréquemment la méthode Vectorielle de Park dans le domaine de l'électrotechnique et de l'ingénierie électrique, en particulier pour détecter et localiser les défauts dans les systèmes électriques triphasés [32].

La Transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q . Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques [33].

Cette méthode consiste à détecter les défauts de circuit ouvert et à localiser les interrupteurs défectueux en calculant la position du milieu de la trajectoire actuelle. En premier lieu, on évalue les courants des trois phases du système électrique. Par la suite, on transforme ces courants en utilisant la transformation vectorielle de Park.

Les grandeurs triphasées (comme les courants) sont transformées par la transformation de Park en grandeurs biphasées, généralement en coordonnées "dq0" (direct, quadrature, zéro). Grâce à cette modification, les grandeurs triphasées peuvent être représentées dans un référentiel tournant qui est synchronisé avec la fréquence du système. Après transformation des courants, l'amplitude et l'angle de phase des courants alternatifs dans le domaine complexe sont obtenus.

Le diagnostic des pannes d'onduleur utilisant analyses Park dans le cadre de la référence Dq est une méthode puissante pour détecter et diagnostiquer des pannes dans les systèmes électriques, notamment dans les onduleurs utilisés dans les entraînements de moteurs et les applications d'énergie renouvelable. Le cadre de référence Dq, également connu sous le nom de cadre de référence synchronisé, transforme les signaux triphasés en un système à deux axes (axe direct et quadrature). Cette transformation simplifie l'analyse des signaux CA et peut aider à identifier divers types de pannes.

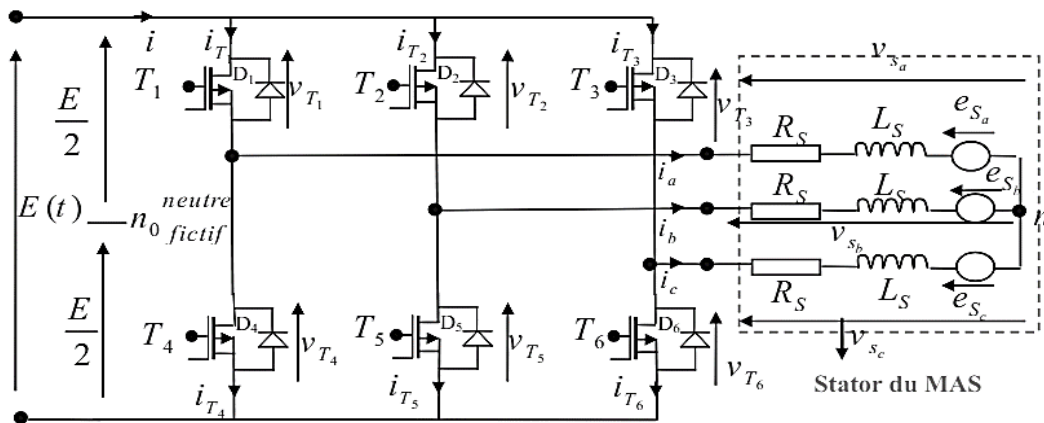


Figure 2.7: Schémas de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

On définit donc les grandeurs de Park pour les tensions, les flux et les courants comme suit :

$$(v_d, v_q, v_0) \quad (\varphi_d, \varphi_q, \varphi_0) \quad \text{et} \quad (i_d, i_q, i_0)$$

On obtient ces grandeurs à partir des grandeurs réelles (a,b,c) en appliquant la transformation de Park suivante :

$$i_{dq0} = P(\theta) \cdot i_{abc} \quad (2.1)$$

$$v_{dq0} = P(\theta) \cdot v_{abc} \quad (2.2)$$

$$\varphi_{dq0} = P(\theta) \cdot \varphi_{abc} \quad (2.3)$$

Le passage aux grandeurs réelles (a,b,c) s'effectue en appliquant la transformation inverse de Park suivante :

$$i_{abc} = P(\theta)^{-1} \cdot i_{dq0} \quad (2.4)$$

$$v_{abc} = P(\theta)^{-1} \cdot v_{dq0} \quad (2.5)$$

$$\varphi_{abc} = P(\theta)^{-1} \cdot \varphi_{dq0} \quad (2.6)$$

On définit les matrices de Park

$$P(\theta_s) = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$I_d = \frac{2}{3} (I_a \cos(\theta) + I_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.8)$$

$$I_q = \frac{2}{3} (I_a \sin(\theta) + I_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.9)$$

La figure (2.8) montre la représentation vectorielle de la transformation de Park appliquée sur un système triphasé équilibré.

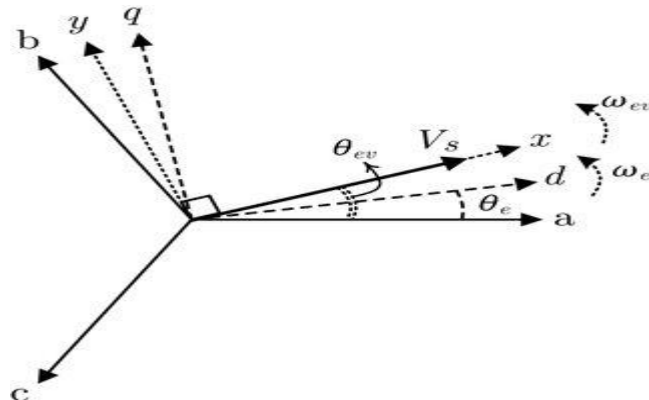


Figure 2.8. Représentation vectorielle de la transformation de Park appliquée sur un système triphasé équilibré.

6.1 Analyse de défauts des onduleurs par la transformation de Concordia

La transformation $\alpha\beta\gamma$ appliquée aux courants triphasés, telle qu'utilisée par Edith Clarke, est :

$$i_{\alpha\beta\gamma}(t) = T i_{abc}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

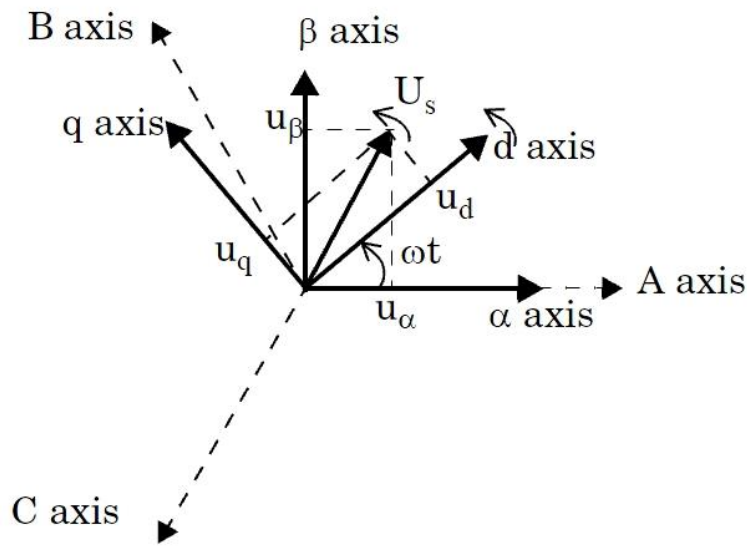


Figure 2.9: La transformation $\alpha\beta\gamma$

où $i_{abc}(t)$ est une séquence de courant triphasée générique et $i_{\alpha\beta\gamma}$ est la séquence de courant correspondante donnée par la transformation T. La transformation inverse est :

$$i_{abc}(t) = T^{-1} i_{\alpha\beta\gamma}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_{\gamma}(t) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La transformation de Clarke préserve l'amplitude des variables électriques auxquelles elle est appliquée. En effet, considérons une séquence de courant triphasée symétrique et directe :

$$i_a(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t)), \quad i_b(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi), \quad i_c(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi) \quad (2.12)$$

où I est la valeur efficace (RMS) des courants $i_{abc}(t)$. En appliquant T à la séquence de courant, on obtient :

$$i_\alpha = \sqrt{2}I \cos(\theta(t)), \quad i_\beta = \sqrt{2}I \sin(\theta(t)), \quad i_\gamma = 0 \quad (2.13)$$

La dernière équation est valable car nous avons considéré des courants équilibrés. Comme montré ci-dessus, les amplitudes des courants dans le repère $\alpha\beta\gamma$ sont les mêmes que celles dans le repère naturel.

Transformation simplifiée

Dans un système équilibré $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$, et donc, on peut également considérer la transformation simplifiée :

$$i_{\alpha\beta}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

qu'est simplement la transformation de Clarke originale avec la troisième équation exclue, et

$$i_{abc}(t) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

qu'est la transformation inverse correspondante.

6.1.a Analyse de la trajectoire du vecteur de courant

Dans les conditions idéales, on suppose que

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2.16)$$

Les courant statorique s'exprimes sous la forme suivante [34] :

$$i_a = \frac{1}{3}(i_a - i_b) \quad (2.17)$$

$$i_B = \frac{1}{3}(i_a + 2i_b) \quad (2.18)$$

$$i_c = \frac{1}{3}(-2i_a - i_b) \quad (2.19)$$

Les courants de phase i_A, i_B, i_C et les courants de ligne i_a, i_b, i_c sont les mêmes. Le passage de Concordia d'une représentation triphasée de la machine à une représentation biphasée équivalente est possible. La transformation de Park du système (i_a, i_b, i_c) en un système biphasé sous la condition d'une pulsation de courants constantes permet de donner les courants biphasés à l'aide des équations suivantes :

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c(t) \quad (2.20)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c(t) \quad (2.21)$$

Le contour de Park est ici un cercle centré à l'origine, un indice de référence simple et intéressant, car ces déviations sont des signes d'anomalies pouvant affecter la machine [35].

Le rapport ψ qui représente la pente de la trajectoire moyenne du courant sur un temps discret est défini par :

$$\psi = \frac{i_{\alpha k} - i_{\alpha k-1}}{i_{\beta k} - i_{\beta k-1}} \quad (2.22)$$

Où k et $k-1$ sont l'instant actuel de calcul et l'instant de l'avant.

A. Exemples d'analyse des courants

1. Phase B en défaut : interrupteur ouvert

Dans le cas où T_2 ou T_5 est ouvert : le courant de la phase B reste nul pendant une demi-heure. Les équations (2.23), (2.24) et (2.25) nous donnent $\psi = \sqrt{3}$ et :

$$i_\alpha = \sqrt{3} i_\beta \quad (2.23)$$

2.Phase A en défaut : interrupteur ouvert

Pour la phase A, en utilisant le même raisonnement T1 ou T4 en utilisant un raisonnement ouvert, les équations (2.23), (2.24) et (2.25) nous donnent $\psi=\infty$ et :

$$i_{\alpha} = 0 \text{ et } i_{\beta} = \sqrt{2}i_{\beta} \quad (2.24)$$

3.Phase C en défaut : interrupteur ouvert

Le défaut concerne la phase C, ici T3 ou T6 ouvert, il se produit lorsque :

$$\Psi=-\sqrt{3} \text{ et } i_{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{2}i_A \text{ d'ou : } i_{\alpha} = -\sqrt{3}i_{\beta} \quad (2.25)$$

Les formes de trajectoire de courant de phase « Lissajous » relatives à chaque interrupteur en défaut sont présentées dans la figure (2.10).

B. Méthode de diagnostic du défaut

Dans la figure (2.10), nous constaterons que le rapport ψ est constant pendant la moitié de la période et égal à l'une des constantes mentionnées précédemment ($\sqrt{3}, -\sqrt{3}, \infty$) [36,37], Ainsi, il est possible de repérer le bras défectueux dans l'onduleur à MLI en évaluant la valeur de cette constante ψ

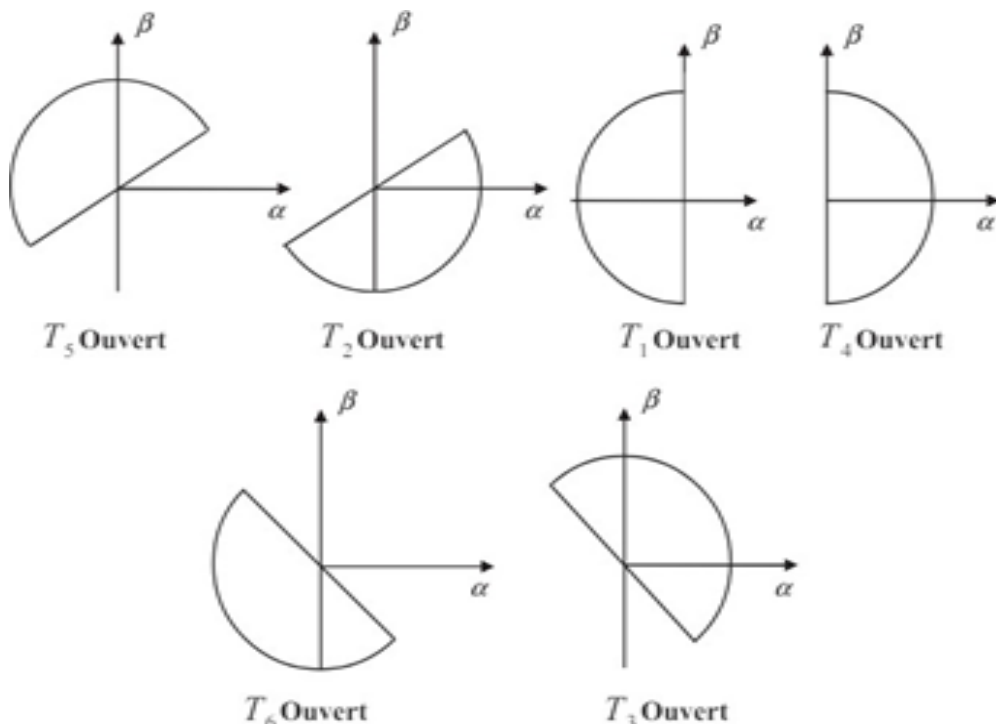


Figure 2.10: Trajectoires de contour dans le référentiel (α,β)

6.1.b Diagnostic des pannes

❖ Défaut de décalage CC

Les pannes de décalage CC sont caractérisées par une composante continue indésirable dans les courants de l'onduleur. Dans le cadre de référence dq, une telle panne peut être détectée par l'apparition de valeurs moyennes non nulles dans les composantes I_d ou I_q [38].

✓ Équations de Détection

En l'absence de pannes, les courants transformés dans le cadre dq ne contiennent pas de composantes continues significatives. Considérons les courants triphasés équilibrés [38]

$$I_a = I_m \sin(\omega t), I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.26)$$

Après transformation de Park, les composantes I_d et I_q sont données par :

$$I_d = I_m \cos(\theta - \omega t), I_q = I_m \sin(\theta - \omega t) \quad (2.27)$$

❖ Défaut de circuit ouvert

Les pannes de circuit ouvert dans un système triphasé se produisent lorsqu'un des conducteurs de phase est interrompu, ce qui entraîne une réduction ou une absence de courant dans cette phase. Dans le cadre de référence dq, un tel défaut peut être détecté par des anomalies significatives dans les composantes I_d et I_q [38].

✓ Équations de Détection

Pour un système triphasé équilibré sans défaut, les courants sont donnés par :

$$I_a = I_m \sin(\omega t), I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.30)$$

Après transformation de Park, les composantes Dq ne contiennent pas d'irrégularités notables.

En cas de panne de circuit ouvert sur la phase a, le courant I_a devient nul :

$$I_a = 0, I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.31)$$

Les composantes Dq sont alors :

$$I_d = \frac{2}{3} (0 \cos(\theta) + I_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.32)$$

$$I_q = \frac{2}{3} (0 \sin(\theta) + I_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.33)$$

En simplifiant, on obtient :

$$I_d = \frac{2I_m}{3} \left(\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right) \quad (2.34)$$

$$I_q = \frac{2I_m}{3} \left(\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right) \quad (2.35)$$

Utilisant les identités trigonométriques, ces équations montrent des variations significatives indiquant une panne [39].

❖ Défaut de court-circuit

Les pannes de court-circuit dans un système triphasé se produisent lorsqu'un ou plusieurs conducteurs de phase sont en court-circuit, ce qui entraîne une augmentation drastique du courant dans les phases affectées. Dans le cadre de référence Dq, un tel défaut peut être détecté par des pics et des irrégularités significatives dans les composantes I_d et I_q [38].

✓ Équations de Détection

Pour un système triphasé équilibré sans défaut, les courants sont donnés par :

$$I_a = I_m \sin(\omega t), I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.36)$$

Après transformation de Park, les composantes Dq ne contiennent pas d'irrégularités notables.

En cas de panne de court-circuit entre les phases a et b, les courants I_a et I_b augmentent considérablement [39].

$$I_a = I_{sc}, I_b = I_{sc}, I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.37)$$

Les composantes Dq sont alors :

$$I_d = \frac{2}{3} \left(I_{sc} \cos(\theta) + I_{sc} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + I_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right) \quad (2.38)$$

$$I_q = \frac{2}{3} \left(I_{sc} \sin(\theta) + I_{sc} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_m \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (2.39)$$

En simplifiant, on obtient :

$$I_d = \frac{2I_{sc}}{3} (\cos(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})) + \frac{2I_m}{3} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.40)$$

$$I_q = \frac{2I_{sc}}{3} (\sin(\theta) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})) + \frac{2I_m}{3} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.41)$$

Ces équations montrent des irrégularités importantes indiquant une panne de court-circuit.

❖ Défaut de déséquilibre

Les pannes de déséquilibre dans un système triphasé se produisent lorsque les amplitudes des courants de phase ou leurs phases ne sont plus égales. Dans le cadre de référence Dq, un tel déséquilibre peut être détecté par des oscillations dans les composantes I_d et I_q à des fréquences spécifiques [39].

✓ Équations de Détection

Pour un système triphasé équilibré, les courants sont donnés par :

$$I_a = I_m \sin(\omega t), I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.42)$$

Après transformation de Park, les composantes Dq ne contiennent pas d'oscillations supplémentaires, seulement des composantes continues.

En présence d'un déséquilibre, par exemple une amplitude différente pour une des phases :

$$I_a = I_m \sin(\omega t), I_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), I_c = I_m' \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.43)$$

Où $I_m \neq I_m'$, les composantes Dq deviennent :

$$I_d = \frac{2}{3} (I_m \cos(\theta - \omega t) + I_m \cos(\theta - \omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_m' \cos(\theta - \omega t + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.44)$$

$$I_q = \frac{2}{3} (I_m \sin(\theta - \omega t) + I_m \sin(\theta - \omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_m' \sin(\theta - \omega t + \frac{2\pi}{3})) \quad (2.45)$$

En développant ces expressions, on peut montrer que des oscillations apparaissent à la fréquence ω et 2ω .

En analysant les composantes I_d et I_q , on détecte des oscillations à la fréquence ω et 2ω , ce qui indique un déséquilibre dans le système [39].

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail les méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse des courants biphasés issues des transformations de Park et de Concordia, en mettant particulièrement l'accent sur les approches d'analyse de la trajectoire des courants biphasés. Nous avons appris qu'une telle analyse est une méthode économique et rapide nécessitant uniquement l'utilisation des courants de sortie de l'onduleur pour lancer le processus de détection de défauts.

Chapitre 3 : Analyses des onduleurs triphases en présence de défauts

1.Introduction

Actuellement, il y a un intérêt croissant pour la surveillance de l'état des convertisseurs qui alimentent les machines asynchrones. Les convertisseurs, tels que les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI), sont susceptibles de présenter des défauts structurels comme des interruptions dans les semi-conducteurs. Ces dysfonctionnements peuvent causer des dommages importants au système de production s'ils ne sont pas détectés à temps, car les dispositifs de protection n'interviennent souvent qu'une fois que le problème est déjà avancé. Ainsi, investir dans la détection précoce des dysfonctionnements apparaît comme une solution indispensable.

Après avoir réalisé une analyse théorique approfondie, nous entamons désormais la phase de simulation à l'aide du logiciel Matlab, en particulier SimPowerSystems. Cette simulation vise à détecter et localiser les défauts dans un onduleur triphasé de tension, afin d'observer et d'analyser l'évolution des grandeurs électriques telles que les courants. Ce chapitre traite de l'application de deux approches spécifiques pour la détection et le diagnostic des défauts dans le convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) utilisé pour l'alimentation. Et l'approche repose sur la trajectoire de vecteur de Park. Enfin, la méthode avancée de la loi de probabilités à plusieurs variables est introduite pour modéliser et évaluer la probabilité de défauts, basée sur les données simulées.

2. Définition des onduleurs multi-niveaux

Le terme « multi-niveaux » est utilisé pour désigner un convertisseur statique qui produit une tension découpée de sortie qui comprend au moins trois niveaux. Les onduleurs multi-niveaux sont basés sur la valeur limitée de la tension de blocage des interrupteurs réalisables jusqu'à présent. Cette valeur est importante. La limite est repoussée au fur et à mesure que les techniques de réalisation sont améliorées, mais elle reste inférieure à une dizaine de kV et ne devrait être franchie qu'avec l'émergence de nouvelles technologies. Cette tension est plus basse que celle des équipements à haute tension. Pour créer un convertisseur multi-niveau, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur de topologie plus avancé. Ils requièrent plus de signaux pour leur commande, mais le convertisseur résultant est présenté de meilleurs résultats. Outre la possibilité d'obtenir une tension de service accrue [40].

3. Effets de l'ouverture d'un IGBT sur les performances d'onduleur

Lorsque l'un des IGBT d'un onduleur est ouvert, cela a un impact direct sur les courants circulant dans le circuit de l'onduleur. Voici une explication simplifiée de ce qui se passe :

1. **Circuit Interrompu** : Quand un IGBT est ouvert, il agit comme un interrupteur ouvert, ce qui empêche le courant de circuler à travers ce bras particulier de l'onduleur.
2. **Impact sur le Courant de Sortie** : Le courant de sortie de l'onduleur est affecté. Si l'IGBT ouvert est celui qui devait conduire le courant dans un certain segment du cycle, le courant de sortie sera réduit ou interrompu, provoquant une distorsion dans la forme d'onde de sortie.
3. **Redistribution du Courant** : Le courant qui aurait normalement passé par l'IGBT ouvert doit maintenant trouver un autre chemin. Cela peut entraîner une surcharge des autres composants du circuit, en particulier les autres IGBT et les diodes, qui peuvent être sollicités de manière inégale.
4. **Augmentation de la Température** : L'augmentation de la charge sur les autres composants peut également entraîner une élévation de la température, ce qui peut, à long terme, endommager les composants ou réduire leur durée de vie.
5. **Distorsion Harmonique** : L'ouverture d'un IGBT perturbe l'équilibre du système de commutation de l'onduleur, entraînant une distorsion harmonique accrue dans la sortie de l'onduleur. Cela peut affecter la performance de l'appareil ou du moteur alimenté par l'onduleur.
6. **Protection du Système** : Les onduleurs sont généralement équipés de circuits de protection qui détectent les anomalies telles qu'un IGBT ouvert. Ils peuvent déclencher une alarme ou arrêter l'onduleur pour éviter des dommages supplémentaires.

En résumé, lorsqu'un IGBT est ouvert, cela peut causer une interruption et une distorsion du courant dans l'onduleur, redistribuer les charges de courant, augmenter les températures et éventuellement endommager d'autres composants. Des mécanismes de protection sont essentiels pour gérer ces situations et éviter des défaillances catastrophiques.

4. Étude de défauts de circuits ouverts dans l'onduleur à deux niveaux par la trajectoire du vecteur de Park

Un onduleur à deux niveaux est un type d'onduleur de tension utilisé pour convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC). L'onduleur à deux niveaux utilise des interrupteurs électroniques (comme des transistors IGBT ou MOSFET) pour créer une tension AC à partir d'une source DC.

Il a deux niveaux de tension, généralement $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$. En commutant rapidement entre ces deux niveaux, il génère une forme d'onde carrée ou quasi-sinusoïdale qui peut être filtrée pour produire une sinusoïde plus lisse.

La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est souvent utilisée pour contrôler les interrupteurs et générer la forme d'onde AC souhaitée. Le rapport cyclique du signal PWM détermine la tension de sortie moyenne.

La configuration de l'onduleur utilisé dans cette partie est celui de la figure (3.1)

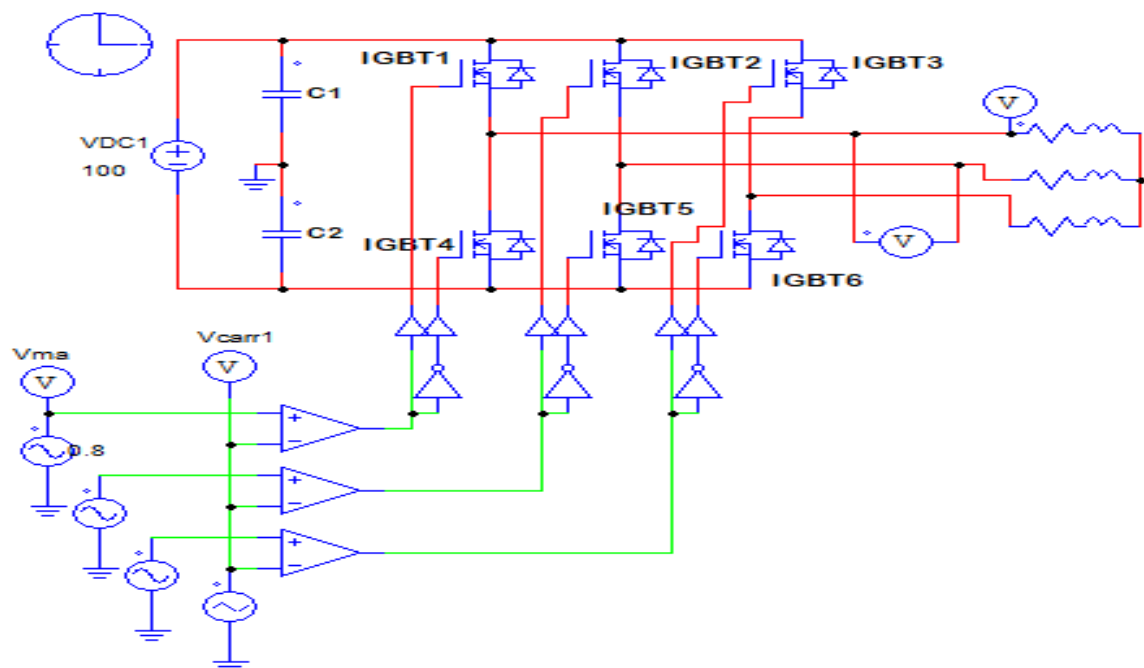


Figure 3.1 : Schéma de la commande MLI d'un onduleur triphasé à deux niveaux

- La figure (3.1) montre un onduleur triphasé à deux niveaux, Pour la simulation d'onduleur triphasé à deux niveaux sous PSIM en utilisant des interrupteurs électroniques tels que les transistors IGBT ou MOSFET, un onduleur à deux niveaux

transforme une tension continue (DC) en une tension alternative (AC). Ajoutez d'abord une source de tension 100 V CC somme de A, B et C. L'onde sinusoïdale est un générateur PWM à 50 Hz.

Après avoir choisir la structure et la commande de l'onduleur, nous avons connecté une charge résistive-inductive triphasée ($R=3.87\Omega$, $L=0.0077H$) et placez des capteurs de mesure pour surveiller la tension et le courant à la sortie de l'onduleur, nous avons simulé le défaut d'un circuit ouvert sur les différents interrupteurs (IGBT).

- **Analyse du cas sain (Conditions normales)**

En conditions normales, la simulation d'un onduleur triphasé à deux niveaux sous PSIM montre des formes d'onde de tension et de courant sinusoïdales et équilibrées pour chaque phase (A, B, C). L'amplitude et la fréquence des tensions de sortie correspondent aux valeurs de référence définies par la modulation PWM, avec une fréquence de 50Hz. Le charge LC atténue efficacement les harmoniques de haute fréquence générées par la commutation des IGBT, produisant des formes d'onde de sortie lisses et proches d'une sinusoïde parfaite. La figure (3.2) montre la tension et le courant obtenus à la sortie de l'onduleur

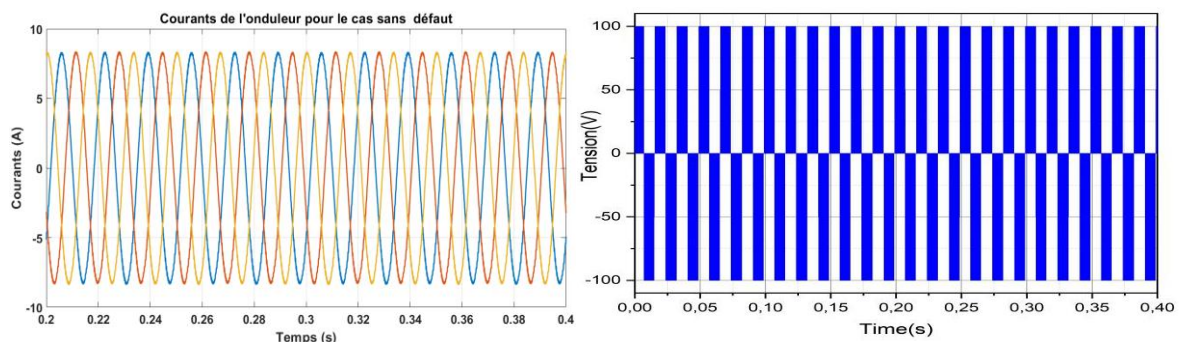


Figure 3.2 : Tension et courants de l'onduleur

- **Analyse de défauts de Circuit Ouvert de l'IGBT**

Dans cette partie nous avons procédé à l'analyse du comportement de l'onduleur en le cas d'ouverture de IGBT. Les courants de sortie sont représentés sur la figure (3.3) suivantes pour les différents défauts (IGBT1 à IGBT6).

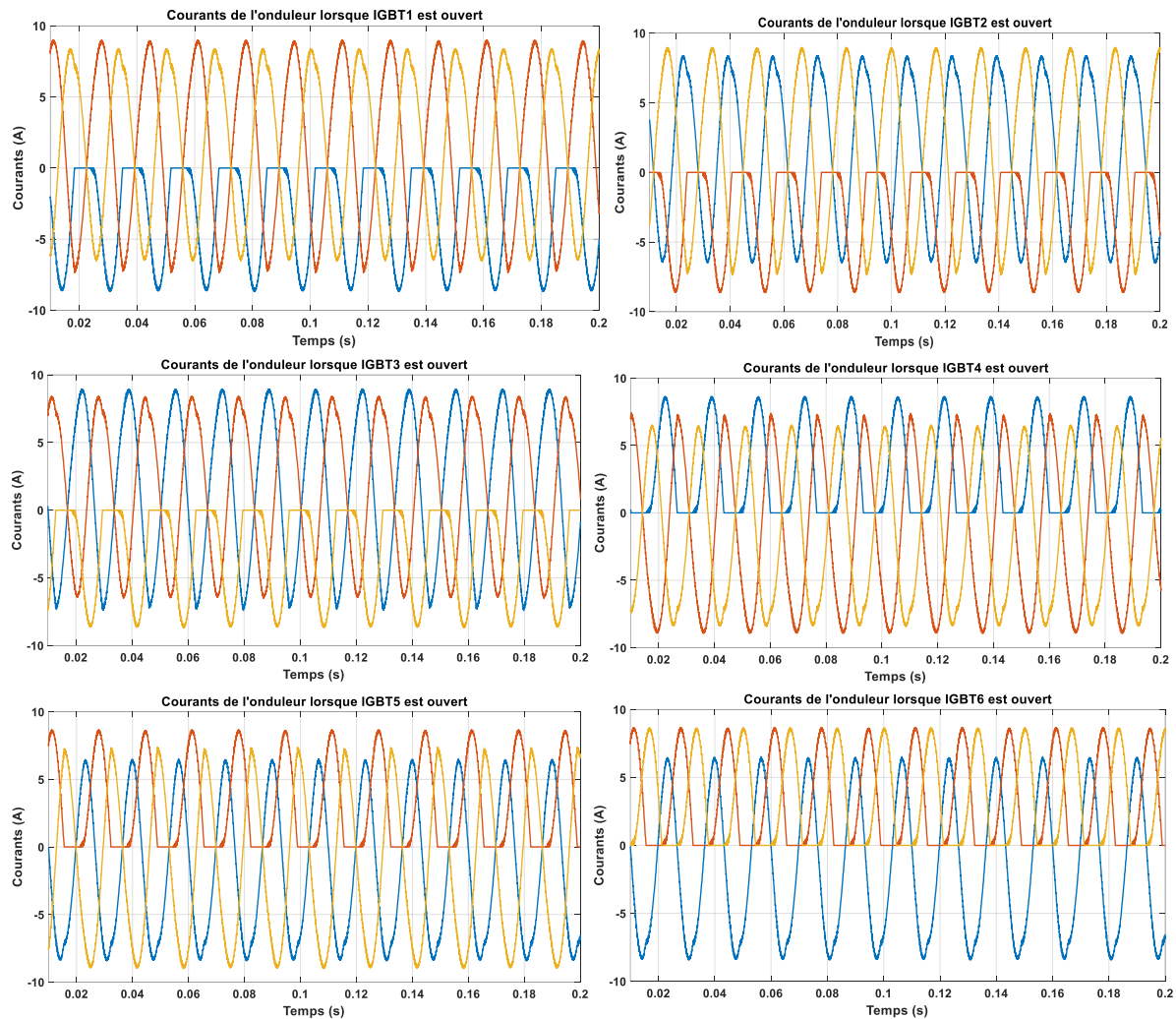


Figure 3.3: Les courants de sortie de l'onduleur en présence de défaut dans les IGBTs

4.1 Analyse de la trajectoire du vecteur de Park

La trajectoire du vecteur de Park offre une visualisation pratique pour contrôler les machines électriques, les convertisseurs et toutes machines à grandeurs polyphasées, démontrant comment les valeurs des grandeurs I_d et I_q changent dans le plan (d-q) en fonction des conditions opérationnelles. Elle offre la possibilité de représenter et d'étudier la dynamique des systèmes polyphasés. Pour notre cas nous avons choisi le calcul du vecteur de Park par l'expression suivantes :

$$I_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c(t) \quad (3.1)$$

$$I_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c(t) \quad (3.2)$$

$$V_p(t) = \begin{pmatrix} I_d(t) \\ I_q(t) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Les composantes du domaine temporel d'un système triphasé dans un cadre de référence abc sont transformées en composantes directes, quadratures et zéro dans un cadre de référence rotatif grâce au bloc de transformation de Park. La figure suivante illustre le trajectoire du vecteur en fonction de ces composantes I_d et I_q :

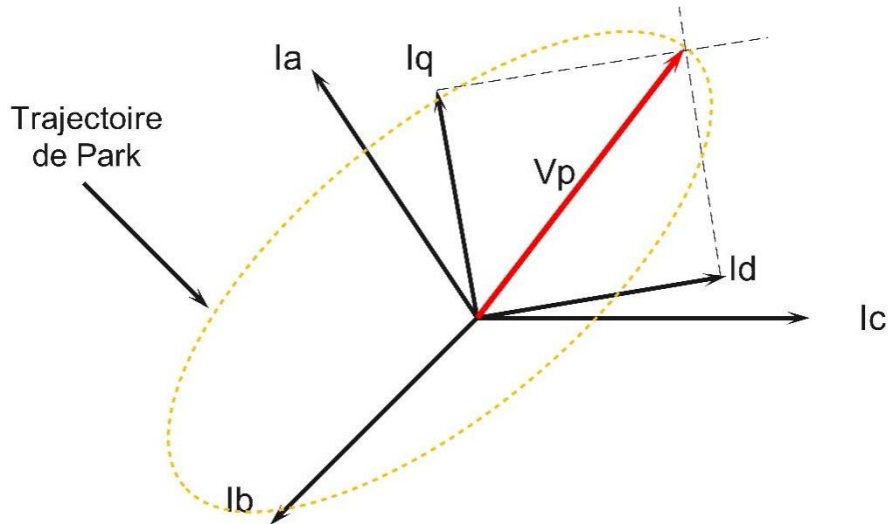
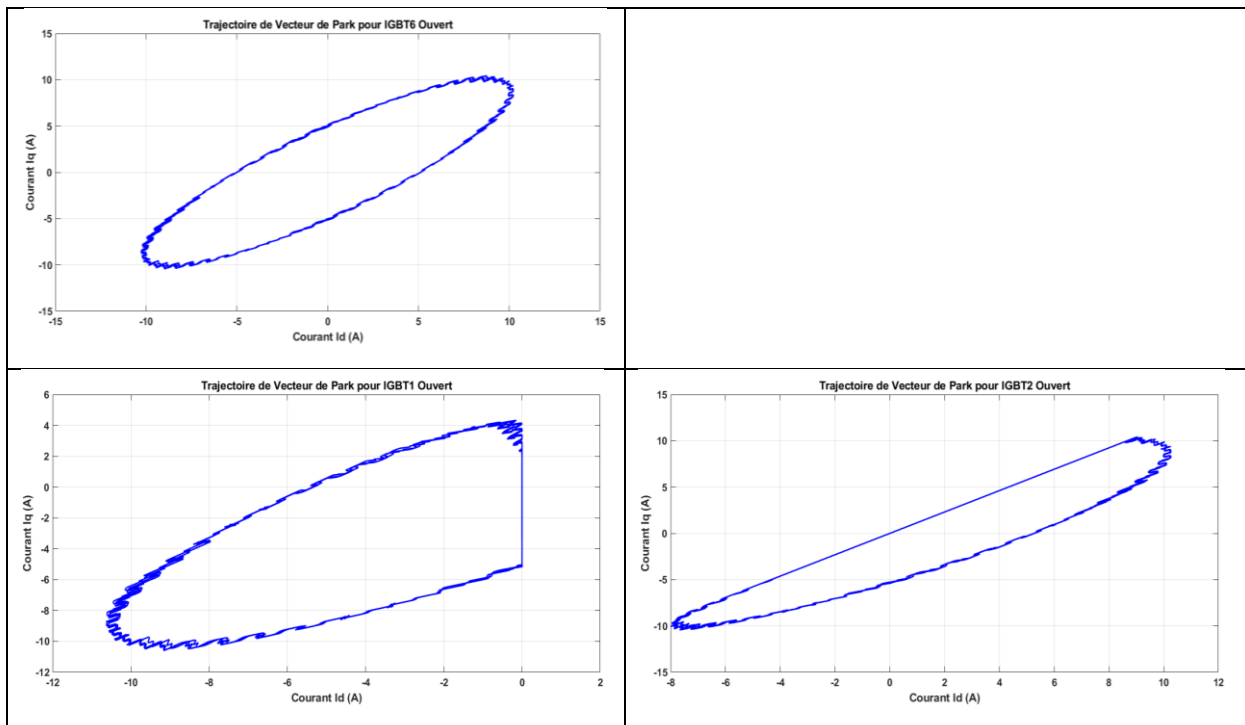


Figure 3.4 : Trajectoire vecteur de Park

La figure (3.5) montre les résultats de calcul de vecteur de Park et sa trajectoire dans le cas sain et les cas avec défauts d'ouverture des IGBTs.



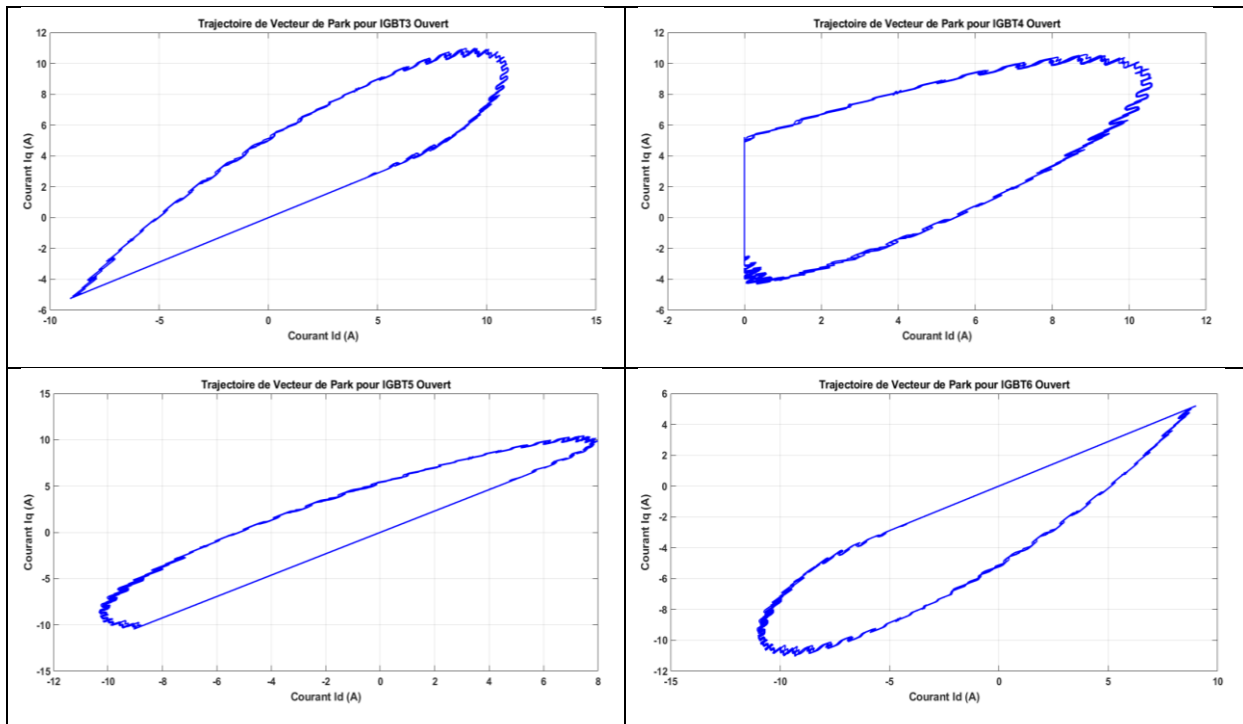


Figure 3.5: La trajectoire de vecteur de Park pour l'état sain et en présence de défaut dans les IGBTs.

✓ **Discussion :**

D'après cette approche, les illustrations précédentes (Fig. 3.5) montrent la trajectoire de vecteur de Park à l'état sain et en présence de défaut dans les IGBT, on peut constater que :

- La trajectoire du vecteur de Park (la fonction tracée $f(I_d, I_q)$) présente une forme elliptique symétrique lorsque l'état de l'onduleur est sain.
- Lorsque le premier bras est affecté par le défaut (IGBT1 ou IGBT4), on peut constater l'effet du dysfonctionnement sur la position de la trajectoire de Park en cas d'ouverture de l'IGBT1 on observe qu'une demi-ellipse est orientée vers la gauche, dans la direction négative de l'axe.
- Lorsque le deuxième bras est affecté par le défaut (IGBT2, IGBT5) : De même, dans les cas de défaut d'ouverture des interrupteurs (IGBT1 ou IGBT4), on peut observer un phénomène similaire. Un décalage de "30°" du contour de Park indique l'ouverture de l'IGBT2, Dans le cas d'ouverture de l'IGBT5, le sens opposé montre une déviation de "-150°" par rapport au reste de la demi-période du la trajectoire de Park.

- Lorsque le troisième bras est affecté par le défaut (IGBT3, IGBT6) : il est noté que lorsque l'IGBT3 présente un défaut, la demi-ellipse effectue une rotation de "150°", tandis qu'il change sa position avec un angle de "-30°" lorsque l'IGBT6 est ouvert.

4.2. Étude de défauts de circuits ouverts dans l'Onduleur à multiniveaux par la trajectoire du vecteur de Park

Un onduleur NPC (Neutral Point Clamped) à 3 niveaux a été utilisé dans cette partie, ce type d'onduleur de puissance convertit le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). Il est largement utilisé dans les applications industrielles et les systèmes d'énergie renouvelable tels que l'énergie solaire et éolienne. L'onduleur NPC à 3 niveaux est conçu pour offrir de meilleures performances, une plus grande efficacité et une réduction de la distorsion harmonique par rapport aux onduleurs traditionnels à 2 niveaux. Cette structure est composée d'une source de courant continu, des condensateurs divisant la tension en courant continu en deux niveaux égaux et des transistors (IGBTs). Les diodes de pincement (Clamp Diodes) Contrôlent le flux de courant et stabilisent les niveaux de tension. L'onduleur NPC à 3 niveaux est donc idéal pour des applications nécessitant une conversion efficace et propre de l'énergie, tout en minimisant les perturbations électromagnétiques et les pertes énergétiques.

- La figure (3.6) montre La structure d'un onduleur à trois niveaux est principalement composée de trois bras symétriques.

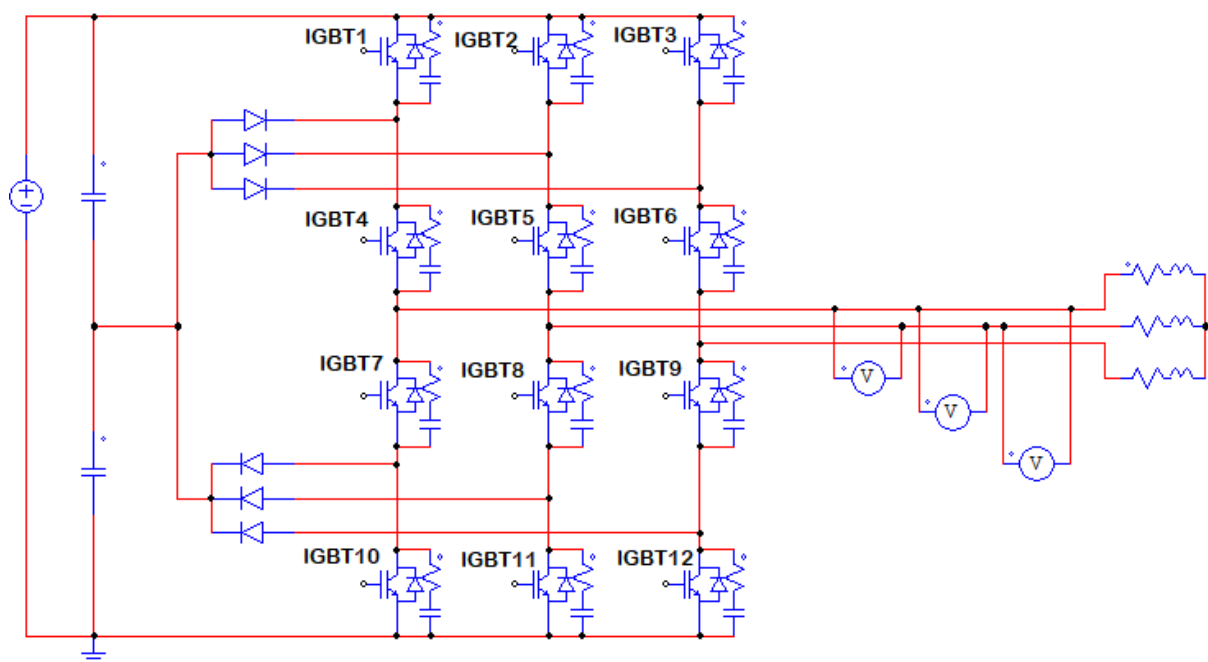
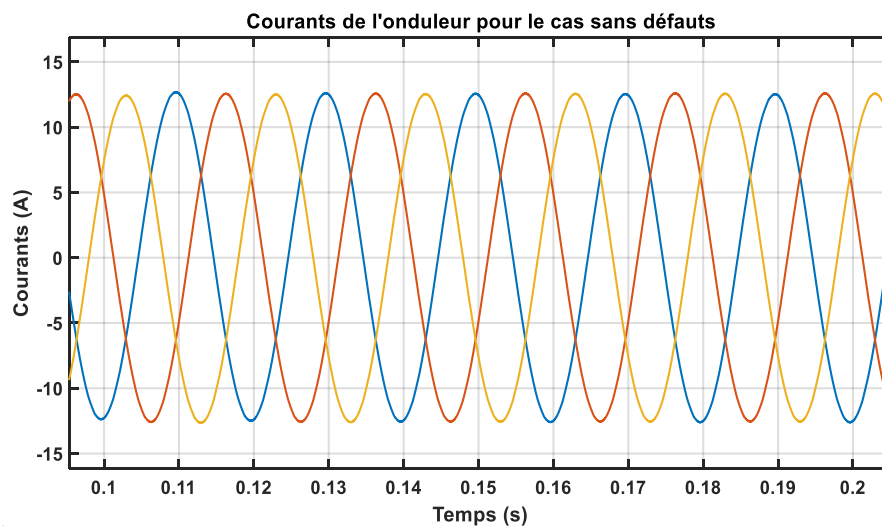


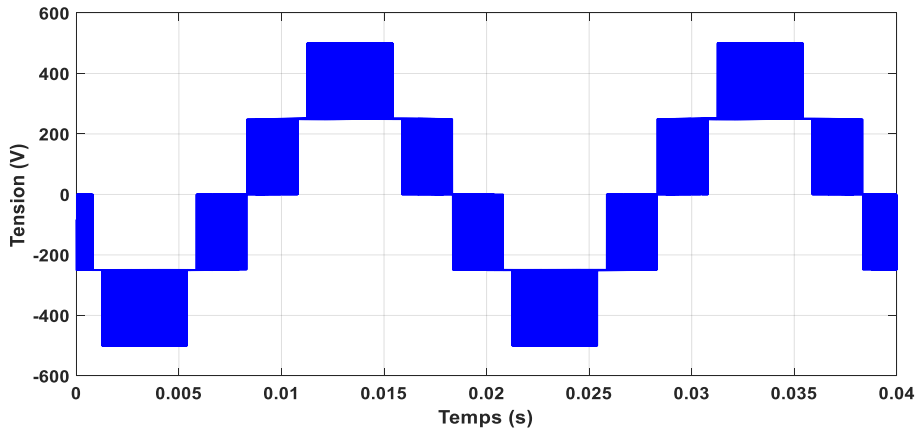
Figure 3.6: Structure d'un onduleur de tension à trois niveaux

Ce type d'onduleurs peuvent rencontrer des défauts de courant et de tension, principalement sous forme de courts-circuits et de circuits ouverts. Les circuits ouverts, causés par des composants défectueux, interrompent le flux de courant, entraînant des déséquilibres de tension et des distorsions de la forme d'onde. Les courts-circuits créent des chemins de courant non désirés, provoquant des courants excessifs qui peuvent surchauffer et endommager les composants. Ces problèmes peuvent gravement affecter la performance et la fiabilité de l'onduleur. Dans notre cas nous allons traiter le problème des circuits ouverts causés par la perte de la jonction principale de l'IGBT.

○ Cas Sain (Conditions Normales) :

Les courants dans chaque phase (A, B et C) sont sinusoïdaux, réguliers et équilibrés. Chaque phase génère un courant sinusoïdal propre, aligné avec la tension d'alimentation, et déphasé de 120 degrés par rapport aux autres phases dans un système triphasé équilibré. La forme d'onde de courant ne présente pas de composantes harmoniques significatives. Les courbes de courant sont lisses et suivent la sinusoïde idéale, indiquant une conversion d'énergie efficace. La stabilité des courants de phase assure un fonctionnement sans heurts et prévisible de l'onduleur. La figure (3.7) courant et tension de l'onduleur le cas sans défauts.





La figure 3.7: courant et tension de l'onduleur pour le cas sans défauts.

○ **Analyse de défauts de circuit ouvert :**

Les figures (3.7) montrent les courants obtenus pour les défauts dans les interrupteurs IGBT1, IGBT4, IGBT7 et IGBT10. On constate que lorsque l'IGBT1, l'IGBT4, l'IGBT7 ou l'IGBT10 se trouvent en défaut sur les différents étages de l'onduleur cela provoque une interruption du courant dans la phase (A, B ou C) avec des valeur moyenne différentes.

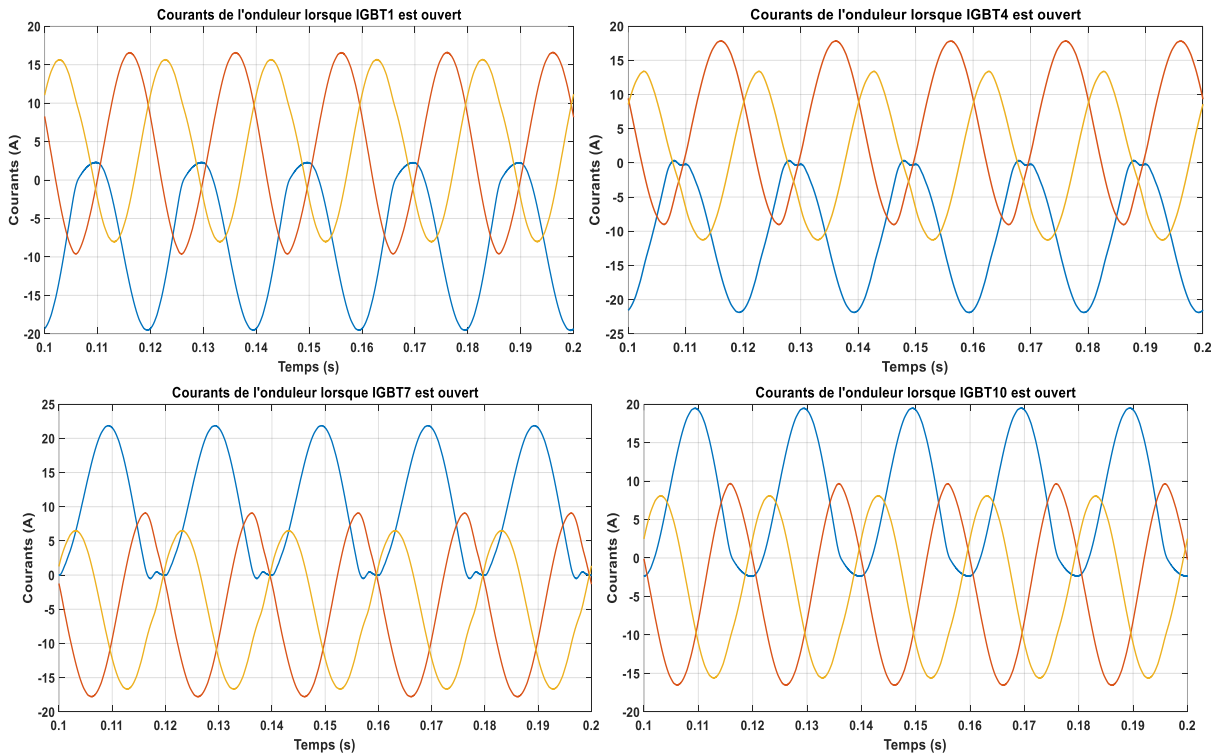
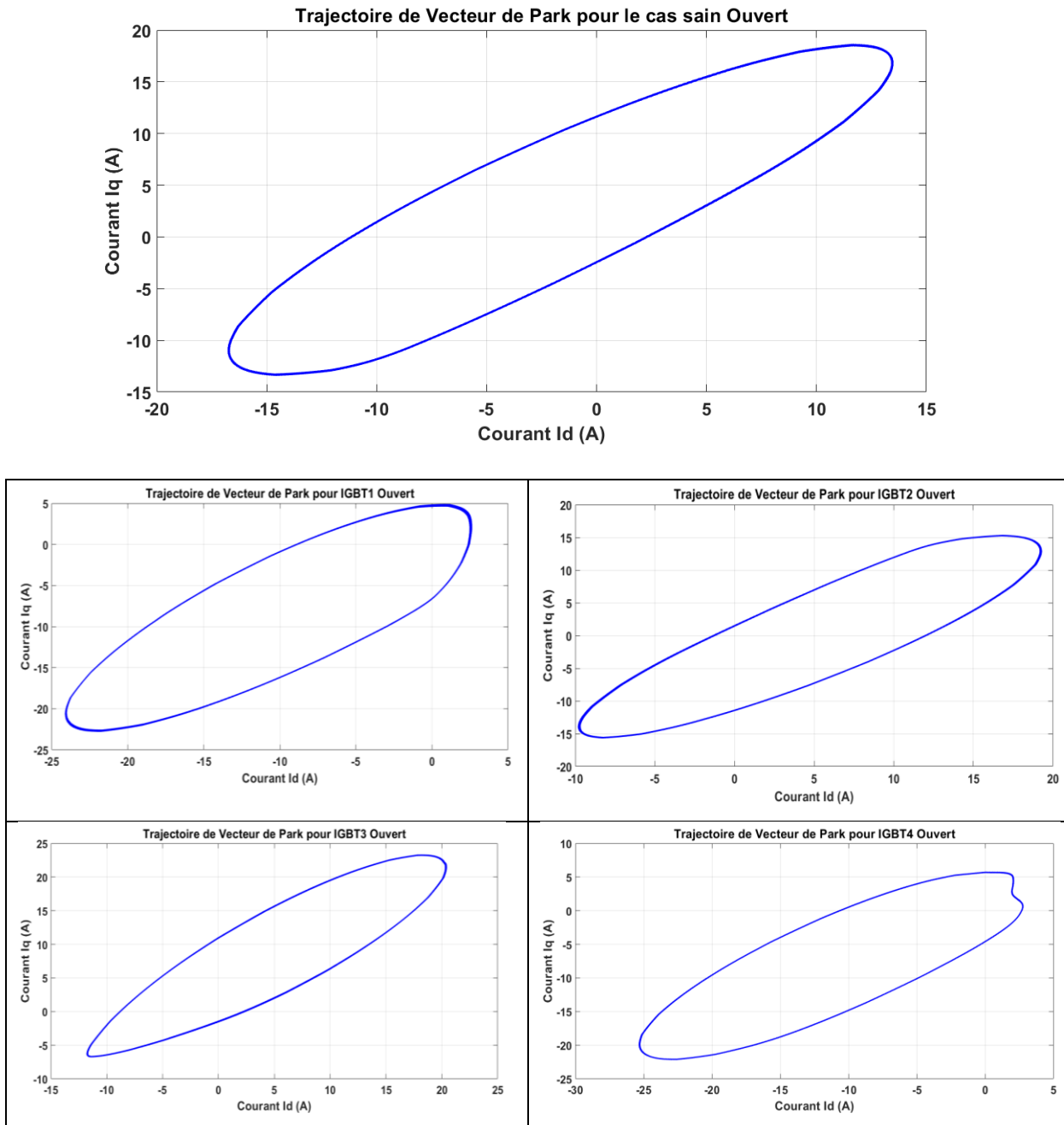


Figure 3.8: Les courants à la sortie de l'onduleur à l'état sain et en présence de défaut dans Les IGBT (1,4,7,10).

4.3 Analyse de la trajectoire du vecteur de Park :

La figure (3.8) montre la trajectoire de vecteur de Park dans le cas sain et le dans le cas de différents défauts de circuit ouvert sur les IGBT1 à IGBT12 :



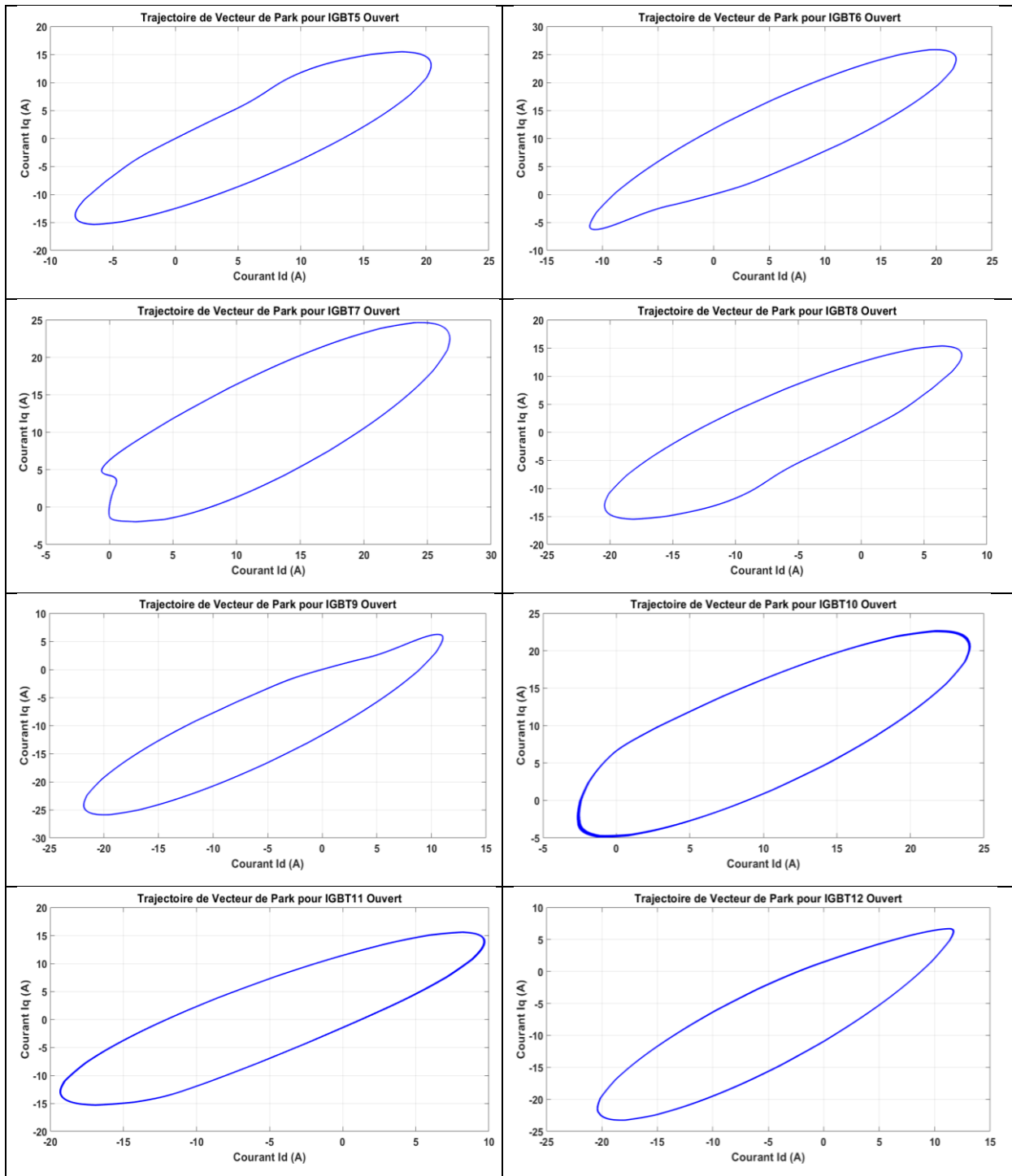


Figure 3.9: La trajectoire de vecteur de Park à l'état sain et en présence de défaut dans les IGBTs.

✓ **Discussions :**

La trajectoire de Park obtenue pour les différents cas montre une légère déformation par rapport aux cas sains. Ces déformations se manifestent en fonction de l'IGBT défectueux, permettant de dire que l'onduleur est en défaut mais ainsi ne permet pas d'identifier d'une

façon directe la position de l'IGBT en défaut. L'analyse minutieuse de ces variations dans la trajectoire de Park est cruciale pour diagnostiquer efficacement les problèmes de l'onduleur.

5. Classification des défauts OC par la loi de probabilité à plusieurs variables

L'interprétation des trajectoires de vecteur de courant de Park d'un onduleur triphasé à trois niveaux pendant des défauts de circuit ouvert se révèle être une tâche complexe. En effet, les formes circulaires générées par ces trajectoires sont difficiles à analyser et ne fournissent pas une indication directe et claire sur le l'interrupteur défectueux.

Pour surmonter cette difficulté, il est nécessaire de recourir à des méthodes complémentaires qui permettent d'affiner notre analyse et de parvenir à une identification précise des interrupteurs défectueux. Parmi ces méthodes, l'analyse des dimensions de la trajectoire de Park pour les différents cas. Cette approche permette de mieux comprendre les comportements anormaux et de localiser avec exactitude les composants défaillants. Bien que les formes des trajectoires de vecteur de courant de Park offrent une visualisation initiale, ils ne suffisent pas à eux seuls pour un diagnostic complet et précis des défauts de circuit ouvert dans un onduleur triphasé à trois niveaux. L'intégration de techniques supplémentaires est donc indispensable pour garantir une identification efficace et fiable des défaillances.

5.1 Loi de probabilité à plusieurs variables

Dans certains problèmes interviennent simultanément plusieurs variables aléatoires. Mis à part les cas particuliers de variables indépendantes et de variables liées fonctionnellement, cela introduit la notion de loi de probabilité à plusieurs variables autrement appelée loi jointe. La description des notions correspondantes, certaines d'entre elles généralisant les notions relatives à une seule variable, est simplifiée de deux manières [41]

La probabilité pour que la variable aléatoire X prenne une valeur numérique inférieure à x alors que Y prend une valeur inférieure à y définit la fonction de répartition.

$$F_{XY}(x, y) = P(X \leq x; Y \leq y) \quad (3.4)$$

Celle-ci est non décroissante en x et en y entre la valeur 0 lorsque les deux variables tendent vers $-\infty$ et la valeur 1 lorsqu'elles tendent toutes deux vers $+\infty$

La densité de probabilité jointe ou loi jointe s'obtient par une double dérivation :

$$f_{XY}(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F_{XY}(x, y) \quad (3.5)$$

Une intégration par rapport à y (resp.x) donne la densité de probabilité marginale ou loi marginale de X (resp.Y) :

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{XY}(x, y) dy \quad (3.6)$$

Le rapport de la densité de probabilité jointe (relative à une valeur x) à la densité marginale de Y (concernant toutes les valeurs x) représente la densité de probabilité conditionnelle de X sous la condition Y=y

$$f_{X|Y}(x, y) = \frac{f_{XY}(x, y)}{f_Y(y)} \quad (3.7)$$

L'espérance mathématique d'une fonction g de deux variables généralise la formule donnée pour une seule variable :

$$E[g(X, Y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) p_{XY}(x, y) dx dy \quad (3.8)$$

L'opérateur espérance est linéaire ; en particulier, l'espérance (la moyenne) d'une somme de deux variables aléatoires est la somme des moyennes :

$$E[X + Y] = E[X] + E[Y] \quad (3.9)$$

Parmi ces espérances, une double transformation de Fourier conduit à la fonction caractéristique:

$$\varphi_{XY}(\theta, \psi) = E[e^{i(\theta X + \psi Y)}] \quad (3.10)$$

Comme pour le cas d'une seule variable aléatoire un développement en série permet de faire apparaître Les moment que l'on peut centrer par soustraction des moyennes.

Si la densité de probabilité conditionnelle de X par rapport à Y est identique à la densité marginale :

$$p_X(x) = \frac{p_{XY}(x, y)}{p_Y(y)} \quad (3.11)$$

On dit que les deux variables sont indépendantes. L'égalité se réécrit :

$$p_{XY}(x, y) = p_X(x)p_Y(y) \quad (3.12)$$

La fonction caractéristique de la somme des variables est alors égale au produit des fonctions caractéristiques individuelles :

$$Z=X+Y \quad \varphi_Z(\theta) = \varphi_X(\theta)\varphi_Y(\theta) \quad (3.13)$$

C'est l'une des principales propriétés de la fonction caractéristique. Cette remarque est, entre autres, utilisée dans la démonstration du théorème central limite.

On appelle corrélation de deux variables aléatoires la grandeur :

$$\rho = \frac{E[(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})]}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (3.14)$$

ou $\sigma(X) = \sqrt{E[(X-\bar{X})^2]}$ est l'écart-type de la variable X. La corrélation de deux variables est comprise entre -1 et 1. Pour une corrélation proche de 1 la variable X aura tendance à être grande quand Y le sera et vice versa. Pour une corrélation proche de -1 la variable X aura tendance à être petite quand Y le sera grande. Si la covariance est nulle on dit que les deux variables sont décolorées. La formule se développe alors en :

$$E[XY]=E[X] E[Y] \quad (3.15)$$

Si les deux variables sont indépendantes, elles sont décolorées, l'inverse n'étant pas vrai, car l'indépendance implique tous les moments au lieu d'un seul. La notion de variables décolorées est plus faible que celle d'indépendance et est loin d'avoir la même utilité.

5.2. Applications en Diagnostic Électrotechnique

1. Maintenance Prédictive

- **Surveillance des Équipements** : En mesurant et en modélisant simultanément plusieurs paramètres comme la tension, le courant, la température et les vibrations, il est possible de détecter des anomalies avant qu'une panne ne survienne. La distribution normale multivariée permet de surveiller les déviations par rapport au comportement normal des équipements.
- **Prévision des Pannes** : En analysant les tendances des données multivariées, on peut prédire la probabilité de pannes futures et planifier les interventions de maintenance en conséquence.

2. Qualité de l'Énergie

- **Analyse des Harmoniques** : Les composants harmoniques de la tension et du courant peuvent être modélisés ensemble pour diagnostiquer des problèmes de

qualité de l'énergie. La distribution normale multivariée permet de détecter des variations anormales qui pourraient indiquer des problèmes tels que la distorsion harmonique.

- **Détection des Transitoires** : Les événements transitoires dans les systèmes électriques peuvent être analysés en utilisant des variables multivariées pour identifier des problèmes tels que les surtensions et les baisses de tension.

3. Diagnostic des Machines Électriques

- **Analyse des Vibrations** : Les mesures des vibrations sur différentes parties d'une machine électrique peuvent être modélisées pour détecter des déséquilibres, des défauts de roulement ou d'autres anomalies mécaniques.
- **Température et Courant** : En surveillant conjointement la température et le courant, il est possible de diagnostiquer des problèmes de surchauffe ou de surcharge dans les moteurs et les transformateurs.

4. Réseaux Électriques Intelligents

- **Détection des Fraudes** : En analysant les données de consommation d'énergie et d'autres paramètres associés, il est possible de détecter des schémas de fraude ou de vol d'énergie.
- **Optimisation de la Distribution** : Les données multivariées provenant des capteurs et des compteurs intelligents peuvent être utilisées pour optimiser la distribution de l'énergie et détecter des anomalies dans le réseau.

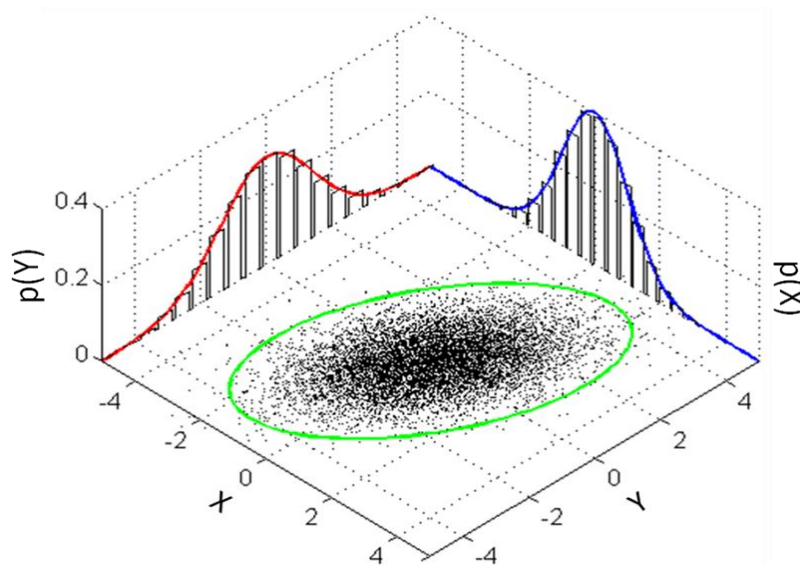


Figure 3.10: La probabilité à plusieurs variables.

5.3 Application de la méthode au diagnostic de l'onduleur

Afin de formuler l'application de cette méthode, nous devons choisir plusieurs variables de référence citées sur le cercle de Park. Ces variables sont essentielles pour caractériser les déformations observées dans les trajectoires et pour faciliter l'identification des défauts spécifiques. En sélectionnant judicieusement ces variables, nous pouvons établir des corrélations plus précises entre les variations des trajectoires de Park et les composants défectueux de l'onduleur. Cette approche permettra de renforcer l'efficacité du diagnostic et d'assurer une identification rapide et fiable des anomalies.

5.4 Choix des variables (points de références)

Dans un script MATLAB développé, un point de référence centrale x_{mean} , ainsi que quatre points extrêmes le long des axes x et y des données (x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max}). Ces points extrêmes sont essentiels pour définir les limites maximales et minimales des variations observées dans la trajectoire du vecteur de Park.

À partir de ces points extrêmes, les moyennes X_{mean} et Y_{mean} ont été calculées comme étant les valeurs centrales de ces extrêmes. Ces moyennes représentent les valeurs centrales des données et fournissent une référence stable pour l'analyse. Cette méthode permet non seulement de caractériser l'état sain, mais aussi d'identifier les variations anormales en comparant les données actuelles aux moyennes calculées.

En établissant ces points de référence et moyennes, le programme permet une analyse plus précise et fiable des données, facilitant ainsi l'identification rapide et précise des anomalies et défauts potentiels.

$$X_{mean} = \frac{x_{min} + x_{max}}{2} \quad (3.16)$$

$$Y_{mean} = \frac{y_{min} + y_{max}}{2} \quad (3.17)$$

Ces moyennes ont servi de repères pour évaluer la localisation d'un éventuel défaut en circuit ouvert dans les données prise d'un onduleur défectueux. En utilisant la loi de probabilité, la distribution des données a été modélisée et les probabilités associées à différentes valeurs ont été estimées, facilitant ainsi la détection et la caractérisation du défaut. Cette approche permet de localiser précisément où se situe le défaut en analysant comment les

mesures divergent par rapport aux points de référence et à leurs moyennes. La figure suivante l'illustre les points de références choisis ainsi que la valeur moyenne obtenue :

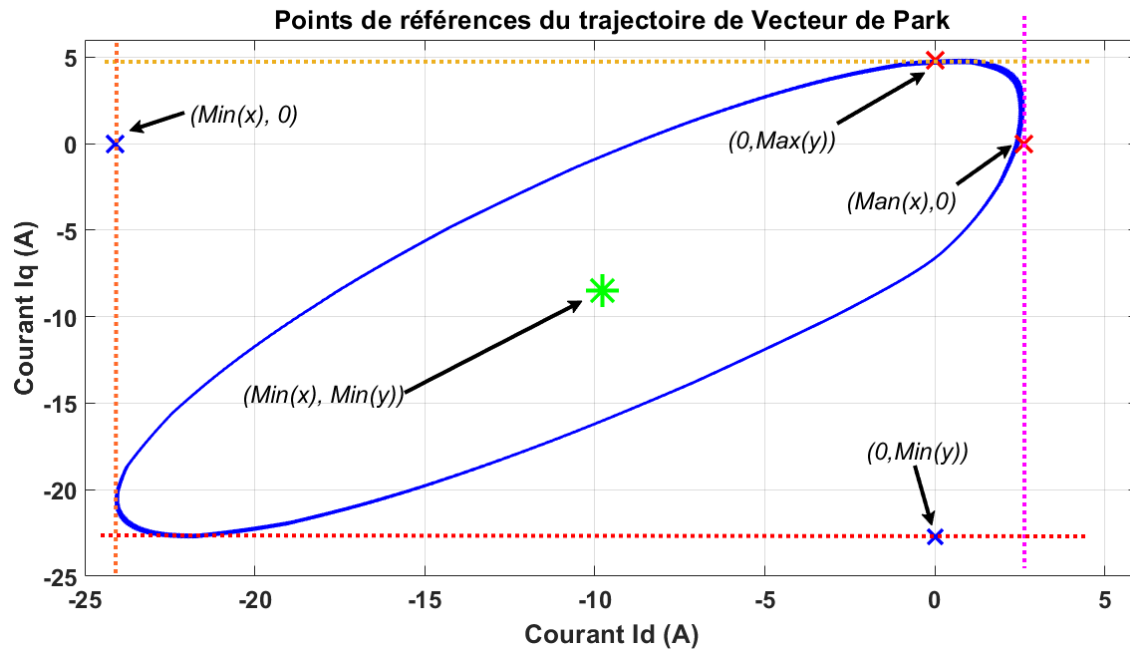


Figure 3.11: Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à deux niveaux

Les tableaux (3.1 et 3.2) indiquent les différentes valeurs des variables choisies en fonction de défauts.

Tableau 3.1: Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à deux niveaux.

	$Max(X)$	$Min(X)$	$Max(Y)$	$Min(Y)$	$Mean(X)$	$Mean(Y)$
<i>Sain</i>	10.237	-10.2730	10.4365	-10.4576	-0.0114	-0.0046
<i>IGBT1</i>	0	-10.6325	4.3315	-10.6032	-3.6669	-3.1706
<i>IGBT2</i>	10.287	-7.9962	10.4363	-10.4573	1.8236	-0.0045
<i>IGBT3</i>	10.974	-9.0793	10.9699	-5.2420	1.8185	3.1658
<i>IGBT4</i>	10.595	0	10.5685	-4.3014	3.6522	3.1716
<i>IGBT5</i>	7.9973	-10.3169	10.4176	-10.4576	-1.8431	-0.0094
<i>IGBT6</i>	9.0140	-11.0361	5.2043	-11.0405	-1.8457	-3.1818

Tableau 3.2 : Point de références de la trajectoire de vecteur de Park pour un onduleur à trois niveaux.

	Max(X)	Min(X)	Max(Y)	Min(Y)	Mean(X)	Mean(Y)
Sain	13.4751	-16.7469	18.5947	-13.3642	-1.6741	2.7764
IGBT1	2.6226	-24.098	4.8407	-22.7525	-9.7842	-8.5020
IGBT2	19.2870	-9.8192	15.2999	-15.6266	4.8786	0.0078
IGBT3	20.4304	-11.7754	23.2718	-6.7233	4.8076	8.3970
IGBT4	2.7731	-25.3342	5.7145	-22.1192	-10.7490	-7.7283
IGBT5	20.4082	-8.0277	15.4954	-15.3974	6.1980	0.0510
IGBT6	21.7852	-11.1405	25.8634	-6.2900	6.0579	10.5878
IGBT7	26.7602	-0.6241	24.6556	-1.9828	12.2952	10.6912
IGBT8	8.0127	-20.4314	15.3729	-15.5141	-6.2159	-0.0760
IGBT9	11.0666	-21.8612	6.2334	-25.9118	-6.1168	-10.6321
IGBT10	24.0763	-2.6764	22.6990	-4.8976	9.7506	8.4586
IGBT11	9.7364	-19.3512	15.61980	-15.3457	-4.9296	-0.0429
IGBT13	11.7384	-20.4289	6.7000	-23.2787	-4.8424	-8.4214

La figure (3.12) montre la distribution de la probabilité de $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour un onduleur deux niveaux sans défauts avec une distribution aléatoire de 100 points et une coefficient $\text{Sigma}=0,8$.

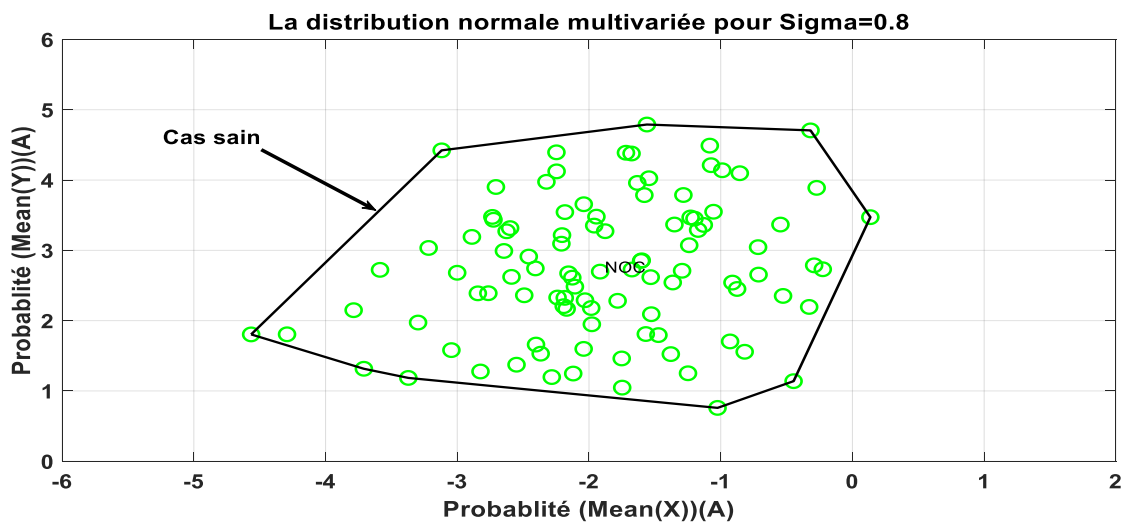


Figure 3.12: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour un onduleur sain

✓ **Onduleur à deux niveaux**

La figure montre la position du point moyen de la trajectoire de Park lorsqu'une variation des courants I_d et I_q se produit en fonctionnement sain. Le coefficient Sigma permet d'augmenter cette plage de variation pour prédire la nature des données et les classifier.

Dans les figures (3.13), (3.14) et (3.15) montrent la distribution des probabilités dans un plans de 2D pour les cas obtenus pour un onduleur à deux niveaux. Plusieurs valeurs de Sigma ont été tester pour voir l'efficacité de cette méthode de classification.

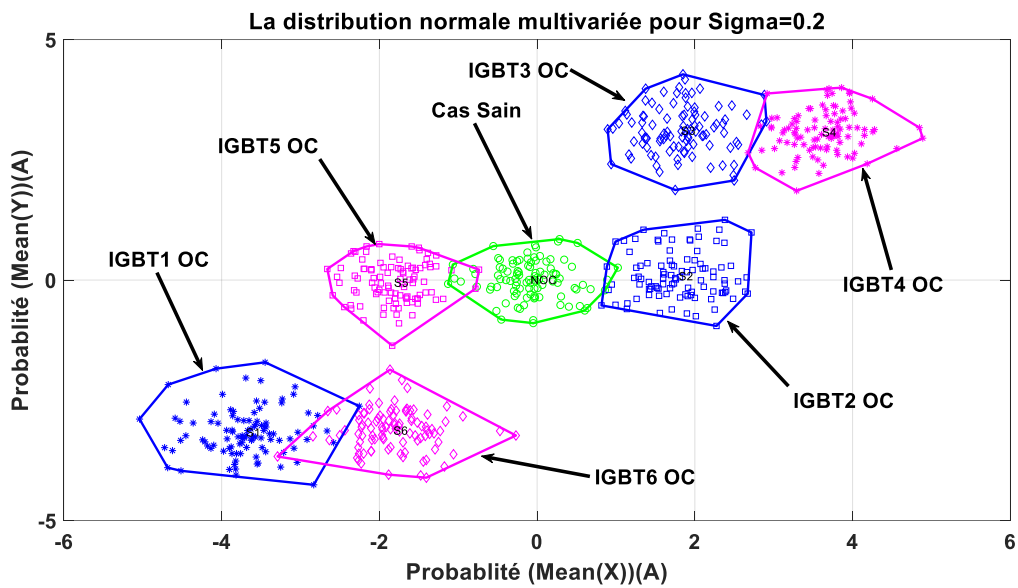


Figure 3.13: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.2$

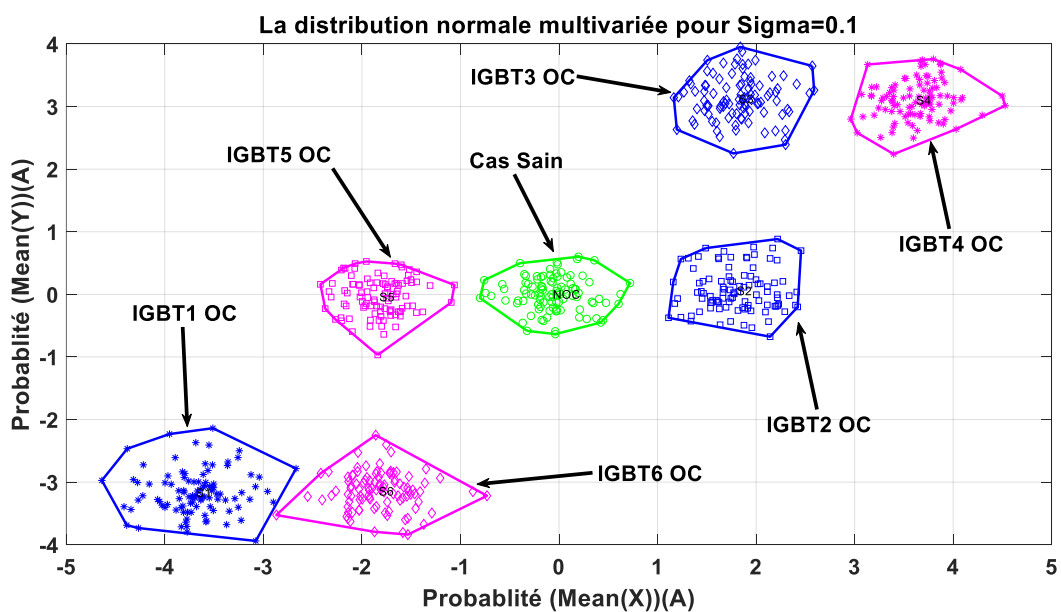


Figure 3.14: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\Sigma=0.1$

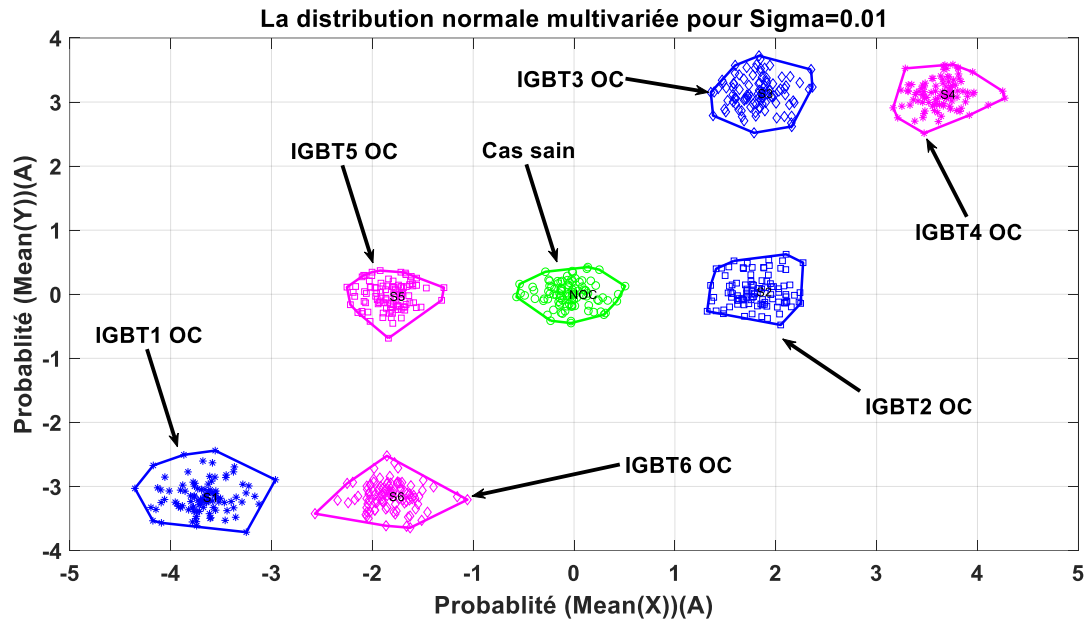


Figure 3.15 : plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\text{Sigma}=0.01$

Pour un onduleur à deux niveaux, la distribution montre une bonne séparation entre l'onduleur sain et celui défectueux. Il faut noter aussi que, malgré l'augmentation de la plage de variation, la séparation reste très claire.

✓ **Onduleur à deux niveaux**

Nous avons appliqué la même procédure appliquée sur l'onduleur à deux niveaux sur celui de trois niveaux et nous avons obtenues les résultats affichés sur les figures (3.16) ,(3.17) ,(3.19)et (3.20) pour des valeurs de sigma égale à 0,8, 0,4, 0.2 et 0,05.

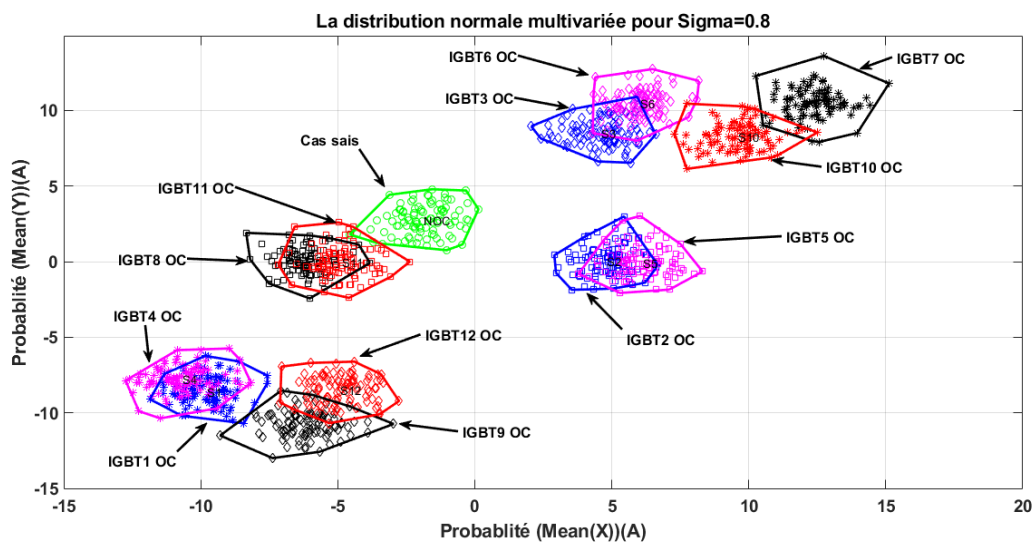


Figure 3.16: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\text{Sigma}=0.8$ (Onduleur à trois niveaux)

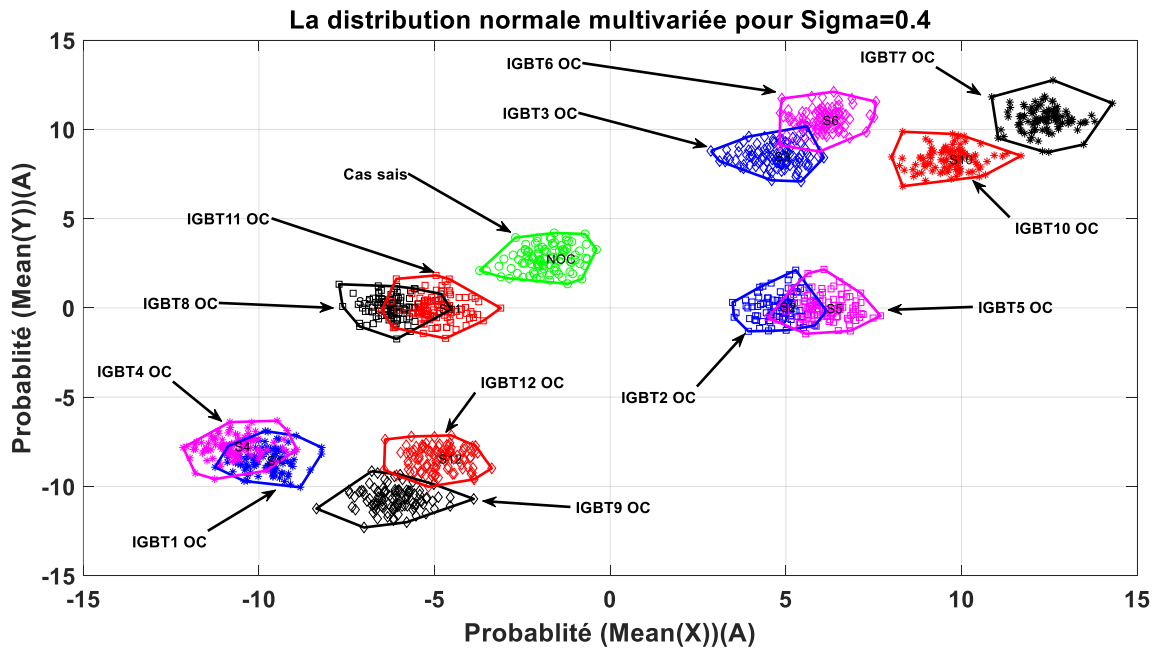


Figure 3.17: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\text{Sigma}=0.4$ (Onduleur à trois niveaux)

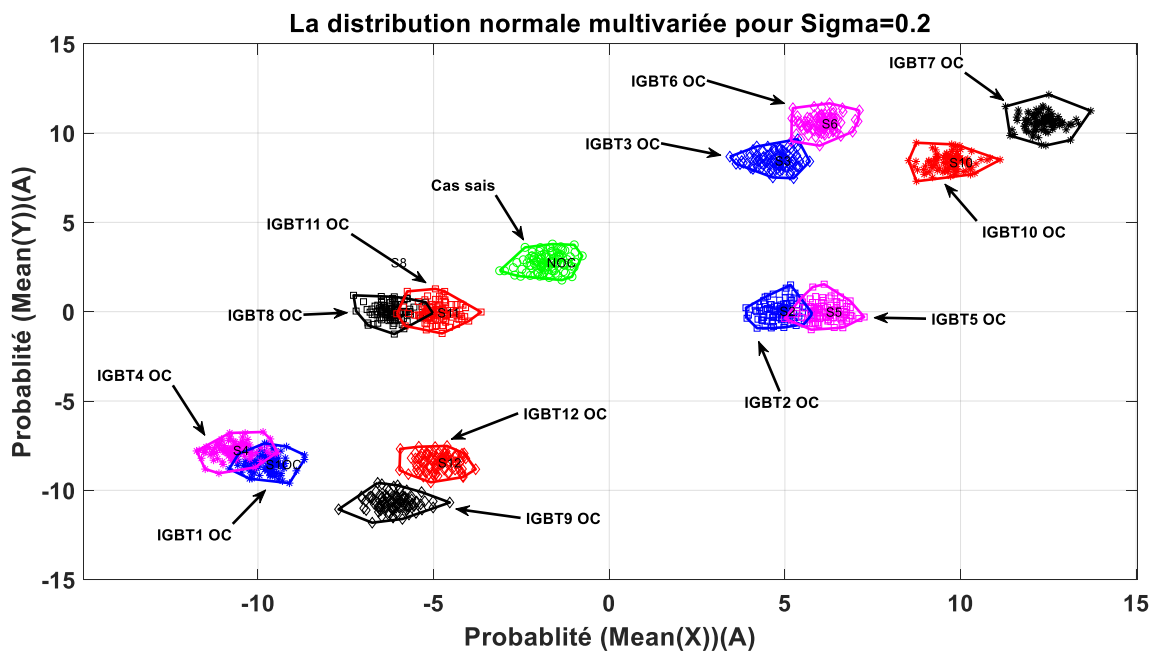


Figure 3.18: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\text{Sigma}=0.2$ (Onduleur à trois niveaux)

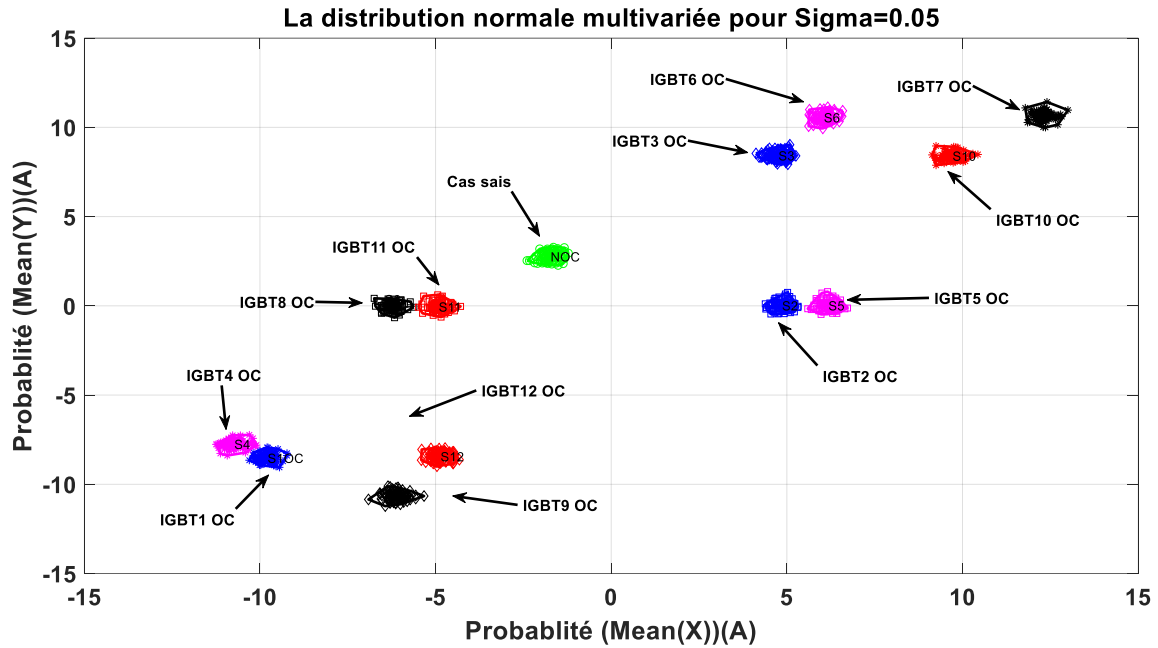


Figure 3.20: Plage de variation du point $p(x_{min})$ et $p(y_{min})$ pour $\text{Sigma}=0.05$ (Onduleur à trois niveaux)

Les résultats montrent que la distribution des défauts est répartie sous forme de paires d'interrupteurs en défaut. Les résultats indiquent une bonne classification de ces paires selon l'étage et la barre où se trouve l'interrupteur défectueux. Toutefois, ces résultats montrent que la séparation entre les interrupteurs classifiés devient difficile pour les paires (IGBT1-IGBT4, IGBT3-IGBT6, IGBT2-IGBT5, IGBT7-IGBT10, IGBT8-IGBT11, IGBT9-IGBT12) lorsque le coefficient Sigma augmente et offre une plage de prédiction importante. La classification devient plus claire lorsque Sigma prend des valeurs plus petites et que la plage de prédiction devient limitée.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les défauts de circuit ouvert dans les interrupteurs de l'onduleur multiniveaux. Les résultats montrent que l'analyse du vecteur de Park pour un onduleur à deux niveaux en présence de défauts est très utile, permettant d'identifier et de localiser le composant défectueux sans recourir à d'autres techniques plus précises.

Pour l'onduleur à trois niveaux, les résultats de l'analyse de la trajectoire de Park montrent une légère déformation indiquant la présence de défauts, mais cette modification n'est pas suffisante pour localiser le composant défectueux. Pour cette raison, nous avons opté pour la classification des défauts en utilisant la méthode basée sur la loi de probabilité à plusieurs

variables. Cette méthode montre une très bonne classification des défauts selon l'étage, la phase et l'interrupteur où le défaut est apparu.

Conclusion Générale

L'étude présentée dans ce projet de fin d'étude représente une exploration approfondie sur la détection des défauts dans les convertisseurs statiques, en mettant en lumière les défauts d'ouverture des semi-conducteurs spécifiques aux onduleurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion (MLI) à deux niveaux et à trois niveaux.

D'abord, nous avons exploré les fondements théoriques des convertisseurs statiques, en soulignant leur rôle critique dans la conversion de l'énergie électrique. Nous examinons également le fonctionnement des semi-conducteurs, en soulignant quelques cas de rappel concernant l'onduleur, suivis des défauts potentiels pouvant affecter son fonctionnement. Il s'agit spécifiquement des défauts de circuit ouvert et de court-circuit qui peuvent survenir au niveau des interrupteurs à semi-conducteurs (IGBT) d'un onduleur.

Ensuite, nous avons approfondie et présenté en détail les stratégies de commande des onduleurs qui est la technique de modulation des largeurs d'impulsion MLI, en mettant l'accent sur leur importance pour assurer un fonctionnement efficace et optimal. De plus, les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts, en particulier le court-ouvert. Qui sont basées sur l'analyse des grandeurs électriques qui est le courant d'une phase. Ces méthodes sont la transformation de Park et la trajectoire de vecteur de Park.

Enfin, nous avons développé la modélisation et la simulation d'une association entre une charge RL et un onduleur triphasé de tension. Cette étude a été réalisée en utilisant SimPowerSystems. Nous avons validé les résultats obtenus par simulation et nous avons interprété ces résultats selon les deux approches précédemment mentionnées. Ensuite. Nous avons proposé une méthode basée sur la loi de probabilités à plusieurs variables, permettant de localiser le composant en défaut.

Cette étude explore les méthodes utilisées présentent une utilité significative dans la détection des défauts des onduleurs polyphasés. En particulier, la loi de probabilité se distingue par sa capacité à modéliser précisément les comportements anormaux, renforçant ainsi la détection des défauts des onduleurs polyphasés.

Références Bibliographiques

- [1] M. Talel CHEBBAH « Étude et simulation d'un convertisseur multiniveaux type PUC », École de technologie supérieur université du QUÉBEC, 2014. Page.1.
- [2] A. Agbossou. Modélisation et mise en œuvre de l'IGBT dans un onduleur de moyenne puissance. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996. Page.1.
- [3] S. Shao, P.W.Wheeler, J. C. Clare, A. J. Watson, "Transactions on Power Electronics," IEEE, 2013. Page.1.
- [4] Alexandre de Bernardinis. Architectures de convertisseurs statiques et contrôle-commande associé pour les systèmes pile à combustible et mécatroniques de puissance : Application aux véhicules électriques. Energie électrique. Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2015. Page.4.
- [5] F. Labrique, G. Séguier, et R. Bausière, « Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance ». Volume 4, la conversion continu-alternatif. 2e éd. rev. Paris : Tec&Doc Lavoisier, 1995. Page.4.
- [6] F. Berrezzek, « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », Mémoire de MAGISTER, BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2006. Page.6.
- [7] F. Brichant « Électronique de puissance » Agence parisienne des distributions, 1977. Page.7.
- [8] B. Zohra, et Ch. Nacira « Diagnostic des défauts dans les convertisseurs » Mémoire de Master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN, TIARET, 2016. Page.7.
- [9] B. Achour et A. Reguieg, « réalisation d'une carte de commande d'un onduleur triphasé », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master, IBN KHALDOUN DE TIARET., 2014. Page.8.
- [10] M. pinard, « Convertisseur et Electronique de Puissance – Dunod /L'usine Nouvelle. 2007. Page.9.
- [11] N. Belhaouchet, « Fonctionnement à Fréquence de Commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées », Thèse de Doctorat, FERHAT ABBAS - SETIF, 2011. Page.10.
- [12] A. Boukaroura, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph », MEMOIRE de MAGISTER, FERHAT ABBAS DE SETIF, 2009. Page.11.
- [13] G. Séguier, R. Bausière, F. Labrique « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternative », Volume 4, Edition tec&doc, 1995. Page.12.
- [14] T. Wildi « Electrotechnique », 3 ème édition de Boeck université, 1999. Page.12.
- [15] J. N. Fiorina « Onduleurs et harmoniques », Cahiers techniques N°159, Schneider électrique, 1992. Page.13.

- [16] A. Chaoui « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de doctorat Université de Sétif, 2010. Page.14.
- [17] « Trends in active power line conditioners », IEEE Transactions on power electronics, 1994. Page.15.
- [18] B.J. Baliga, “Power Semiconductors Devices”, North Carolina State University, PWS Publishing Company, 1996. Page.15.
- [19] K. Nouri, et Y. Zanoun « Analyse thermique d’un onduleur triphasé à base d’IGBT » Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, 2023. Page.16.
- [20] <https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html>. Page.16.
- [21] M. Allamand, « Electronique de puissance ». Page.17.
- [22] T. Benslimane, « caractérisation précise des défauts d’un variateur de vitesse en vue d’élaborer un système automatique de surveillance et de diagnostic », Thèse de Doctorat, de Boumerdès, 2009. Page.19.
- [23] S. SEBASTIEN, « Contribution à la conception de coupleurs magnétiques robustes pour convertisseurs multicellulaires parallèles », Thèse de Doctorat, DE TOULOUSE, 2015. Page.19.
- [24] M. A. Shamsi Nejad, « Architectures d’alimentation et de commande d’actionneurs tolérants aux défauts : régulateur de courant non linéaire à large bande passante », Thèse de Doctorat, L’institut national polytechnique de Lorraine Nancy, 2007. Page.19.
- [25] H. Ben Zemamouche, « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d’IGBT », Mémoire de MAGISTER, BADJI MOKHTAR – ANNA-BA, 2010. Page.24.
- [26] O. Messouci, « Commande sans capteur d’une machine asynchrone à cage : application sur la plateforme temps réel NI Compact RIO CRIO 9022 », Mémoire de MAGISTER, 2015. Page.24.
- [27] Nait Slimani Boukhalfa « synthèse d’observateur non linéaires : application au diagnostic de défaut » mémoire magister, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. Page.26.
- [28] Benlaloui Idriss « commande, observation et diagnostic d’un système non-linéaire : application à la machine asynchrone en présence de défauts » Université de Batna 2 faculté de technologie département d’électrotechnique 2016. Page.27.
- [29] Gaëtan Didier « modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances » docteur de l’université de Henri le 29 octobre. Page.27.
- [30] Bedoud Kholoud « Modélisation et diagnostic de défaillance d’une électrovanne pneumatique » mémoire de magister Université, de Badji Mokhtar 2010. Page.29.
- [31] L. Bin, M. Senior, et S. K. Sharma, « A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters », 2009. Page.29.

- [32] Y. Hadjiyasser Gadi, « Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une machine asynchrone », Mémoire MASTER ACADEMIQUE, KASDI MERBAH OUARGLA, 2014. Page.29.
- [33] S. Chafei, F. Zidani, R. Nait-Said, et M. S. Boucherit, « Fault detection and diagnosis on a PWM inverter by different techniques », J. Electr. Syst., vol. 4, no 2, p. 1–12, 2008. Page.29.
- [34] A.J.M. Cardoso, and A.M.S. Mendes, "Converter fault diagnosis in variable speed DC drives, by Parks vector approach", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal. 1996. Page.33.
- [35] F. Zidani, "Contribution au contrôle et au diagnostic de la machine asynchrone par la logique floue", Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electrotechnique, Université de Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, 2003. Page.34.
- [36] P.M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy- A survey and some new results ", Automatical, Vol. 26, pp.459-474, 1990. Page.35.
- [37] H. Son, T. Kim, D.W. Kang and D.S. Hyun, "Fault diagnosis and voltage control when the three level inverter faults occur ", 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany 2004. Page.35.
- [38] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," Mathematics of Computation, vol. 19, pp. 297-301, 1965. Page.36.
- [39] S. B. Dewan and A. Straughen, Power Semiconductor Circuits, John Wiley & Sons, 1975. Page.37
- [40] Jean-Sébastien Mariéthoz, « Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multi-niveaux asymétriques : topologies, modulation et commande », Thèse de doctorat Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005. Page.41.
- [41] Park, Kun Il, Fundamentals of Probability and Stochastic Processes with Applications to Communications, Springer, 2018. Page.53.