

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT DE  
GENIE ELECTRIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commande Electrique

**THÈME**

**Détection et Diagnostic de Défauts  
d'Un Onduleur par la Technique des  
Réseaux de Neurones**

Préparé par :

**Battane Hanane**

**Benaissa Zohra**

Devant le Jury :

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mr.Y.Mihoub</b>	<b>MCB</b>	<b>Président</b>
<b>Mme.H.Bourenane</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mme.S.Laribi</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION  
2018/2019**





# Remerciements

*On remercie ALLAH, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorons, de nous avoir donné la santé et tout dont nous avons besoin pour l'accomplissement de ce mémoire*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude à Madame LARIBI.S, Maitre de conférences à l'Université de Tiaret pour avoir dirigé ce travail.*

*Nos remerciements vont également à Monsieur Y. Mihoub, Maitre de conférences à l'Université de Tiaret pour son aide et ses conseils précieux.*

*On tient à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*On remercie tout particulièrement nos parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.*

*Merci à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin durant ces années d'études.*

*On ne peut conclure sans un mot de remerciement à tous nos enseignants tout le long de notre formation.*

## Chapitre I

<b>Fig. I.01</b>	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	<b>04</b>
<b>Fig. I.02</b>	Montage d'un onduleur monophasé en demi- pont	<b>04</b>
<b>Fig. I.03</b>	Montage d'un onduleur monophasé en pont complet	<b>05</b>
<b>Fig. I.04</b>	Schéma d'un onduleur triphasé	<b>06</b>
<b>Fig. I.05</b>	Redresseur-onduleur de tension	<b>07</b>
<b>Fig. I.06</b>	Convertisseur avec onduleur de courant	<b>08</b>
<b>Fig. I.07</b>	Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1 <sup>er</sup> demi cycle	<b>09</b>
<b>Fig. I.08</b>	Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2 <sup>eme</sup> demi cycle	<b>09</b>
<b>Fig. I.09</b>	Signal complet de l'onduleur	<b>09</b>
<b>Fig. I.10</b>	Alimentation de secours	<b>11</b>
<b>Fig. I.11</b>	Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	<b>11</b>
<b>Fig. I.12</b>	Court-circuit sur un interrupteur	<b>14</b>
<b>Fig. I.13</b>	Défaut de circuit ouvert	<b>15</b>
<b>Fig. I.14</b>	Transformation de Concordia	<b>17</b>
<b>Fig. I.15</b>	Position du vecteur courant	<b>19</b>
<b>Fig. I.16</b>	Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T1 et T4 en défaut	<b>20</b>
<b>Fig. I.17</b>	Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T2 et T5 en défaut	<b>20</b>
<b>Fig. I.18</b>	Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T3 et T6 en défaut	<b>21</b>

## Chapitre II

<b>Fig. II.01</b>	Onduleur triphasé à deux niveaux	<b>22</b>
<b>Fig. II.02</b>	Schéma de principe de la technique MLI	<b>25</b>
<b>Fig. II.03</b>	Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI	<b>25</b>
<b>Fig. II.04</b>	Modèle de simulation de l'onduleur avec la commande MLI en absence des défauts (sain)	<b>27</b>
<b>Fig. II.05</b>	Simulation de l'onduleur en absence de défaut (sain), (a) Les courant Iabc a la sortie de l'onduleur, (b) Les courant Iabc filtrés de la charge	<b>27</b>
<b>Fig. II.06</b>	Modèle de simulation de l'onduleur en présence de défaut (circuit ouvert)	<b>28</b>
<b>Fig. II.07</b>	Les courant Iabc en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T1 et (b) l'interrupteur T4	<b>28</b>
<b>Fig. II.08</b>	Les courants Iabc en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T2 et (b) l'interrupteur T5	<b>29</b>
<b>Fig. II.09</b>	Les courants Iabc en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T3 et (b) l'interrupteur T6	<b>29</b>
<b>Fig. II.10</b>	Les courants Iabc de la charge en présence de défaut dans le premier bras de l'onduleur (a) ,le 2éme bras (b) et le 3éme bras (c)	<b>30</b>
<b>Fig. II.11</b>	Les courants Iabc de la charge en présence de défaut dans les interrupteurs (a) T1&T2 , (b) T1&T3,(c) T4&T5 , (d) T2&T3 , (e) T5&T6 et (f) T4&T5	<b>32</b>
<b>Fig. II.12</b>	Analyse du contour de Park dans le cas d'un fonctionnement sain :(a) Régime permanent et (b) Régime permanent et transitoire	<b>33</b>
<b>Fig. II.13</b>	Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert	<b>35</b>

<b>Fig. II.14</b>	dans les interrupteur (a)T1, (b)T2, (c)T3, (d)T4, (e)T5 et (f)T6 Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert dans : (a) le premier bras, (b) le 2 <sup>ème</sup> bras et(c) le 3 <sup>ème</sup> bras	<b>36</b>
<b>Fig. II.15</b>	Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert dans 02 interrupteurs de 02 bras différents : (a) T1&T2, (b) T1&T3, (c)T4&T6, (d) T2&T3, (e)T5&T6 et (f) T4&T5	<b>38</b>

### Chapitre III

<b>Fig. III.01</b>	Exemple de neurone biologique	<b>42</b>
<b>Fig. III.02</b>	Modèle d'un neurone formel	<b>43</b>
<b>Fig. III.03</b>	Un réseau de neurone non bouclé	<b>45</b>
<b>Fig. III.04</b>	Un RNA bouclé (a connexions récurrentes)	<b>45</b>
<b>Fig. III.05</b>	Construction des blocs RNA	<b>47</b>
<b>Fig. III.06</b>	Structure du réseau de neurones utilisé	<b>48</b>
<b>Fig. III.07</b>	Architecture de base de réseau de neurones artificiel	<b>49</b>
<b>Fig. III.08</b>	Fonction sigmoïde	<b>50</b>
<b>Fig. III.09</b>	Système de simulation de diagnostic des défauts de l'onduleur par le réseau de neurone	<b>51</b>
<b>Fig. III.10</b>	Performance de RNA	<b>52</b>
<b>Fig. III.11</b>	Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas de fonctionnement : (a) normal et (b) défaut simple dans l'interrupteur T1	<b>52</b>
<b>Fig. III.12</b>	Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas de défaut double :(a) défaut T2&T3 et (b) défaut T1&T6	<b>53</b>

**Chapitre III**

<b>III.01</b>	Fonction de transfert	<b>44</b>
<b>III.02</b>	Classification des défauts avec leurs codifications	<b>50</b>

## Liste des abréviations

---

<b>GTO</b>	Gate Turn off
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>DC</b>	Direct Current
<b>AC</b>	Alternative Current
<b>ON</b>	Ferme
<b>OFF</b>	Ouvert
<b>U</b>	Tension composée
<b>C/S</b>	Convertisseur statique
<b>F</b>	Fréquence
<b>TF</b>	Transformée de Fourier
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformé
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'Impulsion
<b>PWM</b>	Pulse With Modulation
<b>Fp</b>	Fréquence de porteuse
<b>L</b>	Inductance
<b>R</b>	Résistance
<b>H</b>	Henry
<b>F</b>	Farad
<b><math>\Omega</math></b>	Ohm
<b>A</b>	Ampère
<b>V</b>	Volt
<b>RNA</b>	Réseaux de Neurone Artificiel



Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## **Chapitre I : Etat de l'art**

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2 Définition de l'onduleur.....</b>	<b>03</b>
<b>I.3 Les type de l'onduleur.....</b>	<b>04</b>
<b>I.3.1 Onduleur monophasé.....</b>	<b>04</b>
I.3.1.1 Onduleur monophasé en demi- pont.....	04
I.3.1.2 Onduleur monophasé en pont.....	05
<b>I.3.2 Onduleur triphasé.....</b>	<b>05</b>
<b>I.4 Classification des onduleurs.....</b>	<b>06</b>
I.4.1 Onduleur autonome (non assisté).....	06
I.4.2 Onduleurs non autonome (assisté).....	08
<b>I.5 Onduleur à résonance.....</b>	<b>08</b>
<b>I.6 principe de fonctionnement de l'onduleur.....</b>	<b>08</b>
<b>I.7 Utilisations des onduleurs.....</b>	<b>10</b>
I.7.1 Alimentation de secours.....	10
I.7.2 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes..	11
<b>I.8 Différent type de défaut affectant l'onduleur.....</b>	<b>11</b>
<b>I.9 Les méthode d'analyse des défauts.....</b>	<b>15</b>
I.9.1 Méthode d'analyse de spectre.....	15
I.9.2 La méthode vectorielle de Park(Concordia).....	17
<b>I.10 Conclusion.....</b>	<b>21</b>

## **Chapitre II : Diagnostic des défauts dans les convertisseurs statiques**

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2 Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.</b>	<b>22</b>
<b>II.3 Différentes techniques de contrôle d'un onduleur de tension.....</b>	<b>24</b>
<b>II.4 Commande par modulation sinus- triangle.....</b>	<b>24</b>
<b>II.5 Objectif de la technique MLI.....</b>	<b>25</b>
<b>II.6 Caractéristique de la commande MLI.....</b>	<b>26</b>
<b>II.7 Simulation de l'onduleur avec la commande MLI.....</b>	<b>26</b>
<b>II.7.1 Cas de fonctionnement sain de l'onduleur avec la commande MLI.....</b>	<b>26</b>
<b>II.7.2 Cas de fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert de l'onduleur avec une commande MLI.....</b>	<b>28</b>
<b>II.8 Analyse avec le Contour de PARK.....</b>	<b>33</b>
<b>II.9 Conclusion.....</b>	<b>39</b>

## **Chapitre III : Diagnostic des Défaut dans les onduleurs par les réseaux de neurones**

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>III.2 Historique.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3 Réseaux de neurones : définitions et propriétés.....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.1 Neurone biologique.....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.2 Neurone formel.....</b>	<b>42</b>
<b>III.4 Fonction d'activation.....</b>	<b>43</b>
<b>III.5 Architecture des réseaux de neurones.....</b>	<b>45</b>
<b>III.6 Apprentissage des réseaux de neurones.....</b>	<b>46</b>
<b>III.7 Avantages des techniques intelligentes.....</b>	<b>46</b>
<b>III.8 Application des RNA pour la détection des défauts de l'onduleur.....</b>	<b>47</b>
<b>III.8.1 Construction des blocs RNA.....</b>	<b>47</b>
<b>III.9 Apprentissage de réseaux de neurones.....</b>	<b>51</b>
<b>III.9.1 Système de diagnostic par les réseaux de neurones.....</b>	<b>51</b>
<b>III.9.2 Résultats et interprétations.....</b>	<b>51</b>
<b>III.9.3 Tests de RN utilisé.....</b>	<b>52</b>
<b>III.10 Conclusion.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion général.....</b>	<b>54</b>

Grâce aux progrès considérables réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, il a été possible de l'exploiter dans les différents secteurs industriels.

L'électronique de puissance est basée sur l'usage des composants de type semi-conducteurs qui sont des interrupteurs électroniques, soient commandables, ou noncommandables associés intégralement dans un convertisseur statique. Ces derniers sont utilisés afin d'améliorer la conversion d'énergie, et le contrôle du transfert de puissance dans certains domaines tel que l'alimentation des machines à courant alternatif ou le domaine informatique (domaines les plus dominants ces dernières décennies). Ces applications furent pendant longtemps limitées à la technique de haute fréquence, mais à la suite de l'apparition de nouveaux interrupteurs de puissance tel que les **GTO**, **MOSFET** et les **IGBTs** et leurs développements, de nouvelles techniques peuvent être envisagées. Parmi ces convertisseurs les plus étendus, les onduleurs qui sont des convertisseurs commandables permettant la conversion de l'énergie de la forme continue-alternative.

La commande des convertisseurs statiques et la défaillance des composants sont des causes principales de création des défauts dans un convertisseur qui soient un circuit ouvert, court-circuit ou vieillissement des composants. Ces types de dysfonctionnements induisent des contraintes d'endommagement pour le système (le convertisseur lui-même), ces défauts doivent être rapidement détectés et localisés et afin d'empêcher la répartition de danger de ces défauts.

Auparavant, la détection des défauts est effectuée via l'emploi des capteurs, qui sont coûteux généralement. Par contre, ces dernières années les méthodes de diagnostic furent développées pour la détection et la localisation des défauts dans les convertisseurs statiques.

Les réseaux de neurones artificiels peuvent être exploités en diagnostic comme outil principal de classification et de surveillance. En effet, le problème de surveillance peut être considéré comme étant un problème de reconnaissance des formes et de classification où les classes correspondent aux différents modes de défaillance du système et des formes représentant le comportement du système.

Suite à ces considérations, ce présent travail s'inscrit dans le cadre de cette récente thématique de recherche qui est la surveillance des équipements industriels pour apporter une contribution à l'étude de la détection et de la localisation des défauts de l'onduleur par la technique des réseaux de neurones

La technique de détection de défauts adoptés dans le présent mémoire concerne la méthode de vecteur de Park qui consiste à détecter et localiser l'interrupteur défaillant par ailleurs.

Ce présent mémoire est organisé comme suit :

**Le premier chapitre** est consacré à l'état de l'art du convertisseur statique (l'onduleur) avec les différents défauts qui peuvent l'affecter ainsi que les différentes techniques utilisées pour détecter ces différents défauts.

**Dans le deuxième chapitre**, nous allons dans un premier temps présenter la modélisation avec des tests de simulation de l'onduleur à deux niveaux et la stratégie de la commande MLI. Cette stratégie permet de donner une meilleure forme de la tension de sortie de l'onduleur. Après la création d'un défaut de type circuit ouvert, une technique qui est basée sur l'analyse des grandeurs électriques qui est le courant d'une phase par l'analyse du contour de Park  $I_{\beta} = f(I_{\alpha})$ .

**Le troisième chapitre** est dédié à la présentation des résultats de simulation concernant le diagnostic du défaut de l'onduleur (circuit ouvert), en utilisant les réseaux de neurones.

Et enfin on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

## I.1 Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques. Les applications de l'électronique furent pendant longtemps limitées à la technique des hautes fréquences. Les possibilités d'application étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques alors disponibles. Cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux hautes exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques spéciaux de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes, que les nouvelles techniques peuvent être envisagées, ainsi une nouvelle branche de l'électronique appelée l'électronique de puissance. A la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissances, qui peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (diodes) et éléments redresseurs contrôlables (thyristors, triacs, transistors...). Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (commande de gâchettes, radiateurs de dissipation, circuit RC de protection), composent des modules standard permettant la conversion de puissance, tel que les redresseurs, les onduleurs, les cyclo convertisseur...etc.

## I.2 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électronique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. **Fig. I.01** représente un schéma de principe de l'onduleur. [1]

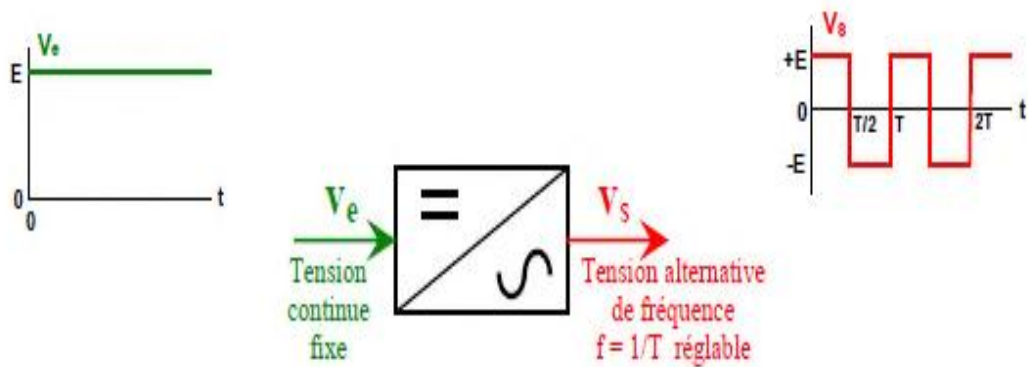


Fig. 1.01 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

### I.3 Les type de l'onduleur

Il existe deux types de l'onduleur (monophasé et triphasé)

#### I.3.1 Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivrant à sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de sources. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer suivant leur topologie [2]

##### I.3.1.1 onduleur monophasé en demi- pont

Pour réaliser un onduleur monophasé avec deux interrupteurs, on place à l'entrée un diviseur capacitif formé de deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  de même capacité  $C$ . Si  $C$  est suffisant, on obtient deux tensions  $E_{c1}$  et  $E_{c2}$  sensiblement constantes et égale à  $E/2$ . [3]

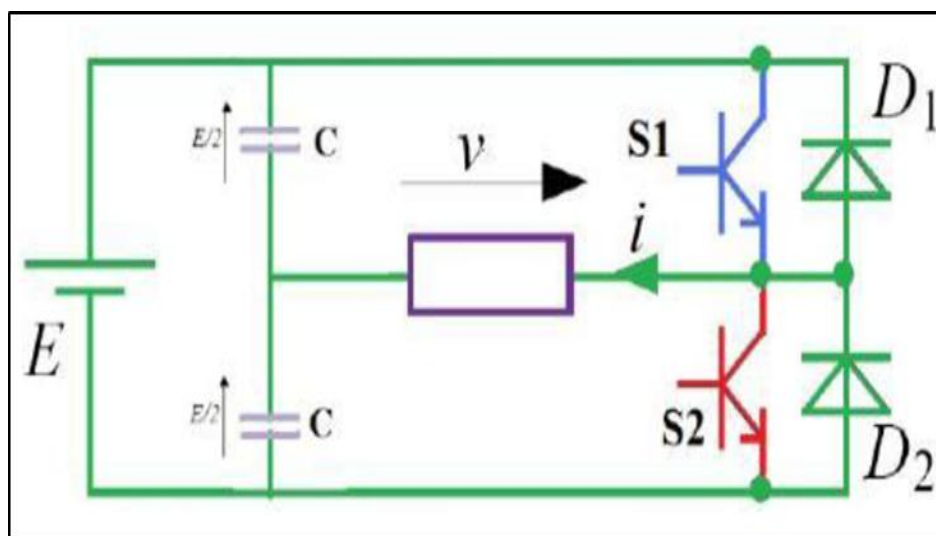


Fig. I.02 : Montage d'un onduleur monophasé en demi- pont

### I.3.1.2 Onduleur monophasé en pont

En passant de deux à quatre interrupteurs, on supprime la nécessité du point milieu du côté entrée : de plus on peut faire varier le rapport entre le fondamental de la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée grâce à la possibilité de réaliser  $V = 0$ .

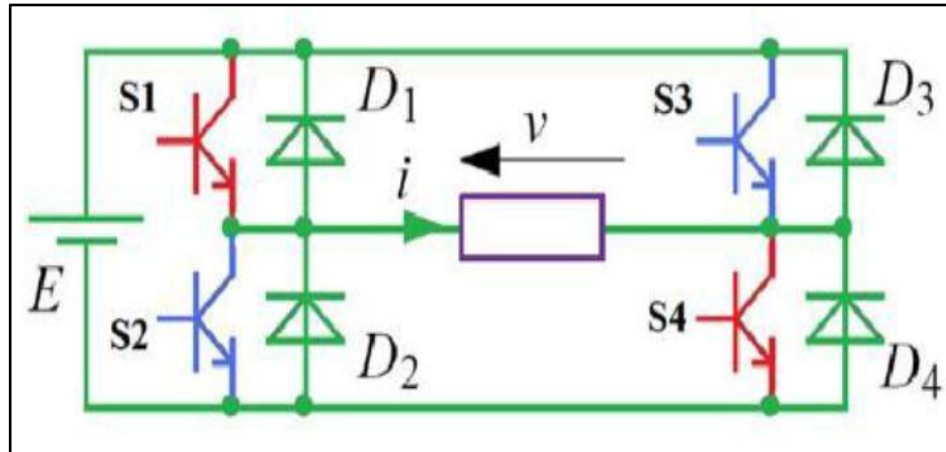


Fig. I.03 : Montage d'un onduleur monophasé en pont complet

### I.3.2 Onduleur triphasé

Pour réaliser un onduleur triphasé, on regroupe trois demi-ponts monophasés et utilisant un diviseur capacitif commun pour la commande des trois phases contenant six interrupteurs bidirectionnels en courant réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. Il s'agit généralement des IGBTs montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter certaines contraintes :

- Les interrupteurs d'un même bras doit conduire de façon complémentaire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension.
- La mise en antiparallèle des diodes au niveau des interrupteurs permet toujours au courant de ligne de trouver un chemin possible.

Théoriquement les deux semi-conducteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire, pratiquement les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire simultanément afin d'éviter de court-circuiter la source de tension, donc il faut générer un temps d'attente appelé temps mort entre les commandes de blocage et l'amorçage des deux interrupteur d'un même bras. [4]

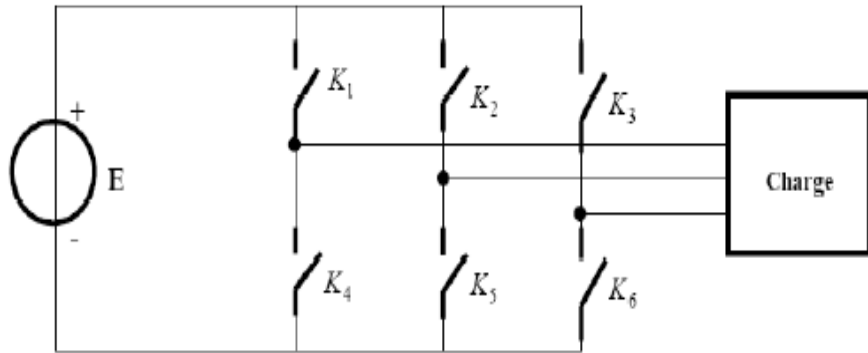


Fig. I.04 : Schéma d'un onduleur triphasé

## I.4 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleur, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

### I.4.1 onduleur autonome (non assisté)

Les onduleurs autonomes (ou oscillateurs) qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence de la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

- les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue. [1]

#### • Onduleur autonome de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui permet de convertir la tension d'une source d'entrée continue (source d'impédance interne négligeable), cette tension n'est pas affectée par les variations du courant  $\langle i \rangle$  qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie, le courant à la sortie est donc identique au courant d'entrée et dépend de la charge placée du côté alternative et peut être quelconque à condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou force électromotrice



P0°Yalternative). Donc cette charge doit être reliée directement au borne de sortie de l'onduleur. [5]

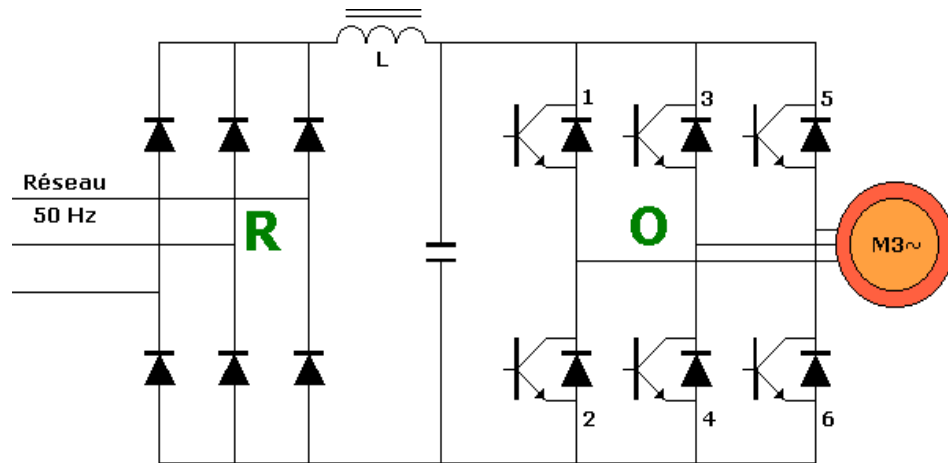


Fig. I.05 : Redresseur-onduleur de tension

#### • Onduleur autonome de courant

Un onduleur de courant (commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continue (source d'inductance interne très importante) le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes. La source de sortie est une source de courant alternative puisque la source d'entrée est une source de courant (imposé), la tension à la sortie est donc identique à la tension d'entrée et dépend de la charge placée du côté alternative et peut être quelconque à condition qu'il ne s'agit pas d'une autre source du courant alternative ou d'un circuit inductif donc cette charge doit être reliée directement au bornes de la sortie de l'onduleur, l'avantage de l'onduleur de tension par rapport à celui du courant est indéniable et son utilisation dans de nombreuses applications se justifie principalement par les deux avantages :

- la bidirectionnalité en courant de sa topologie grâce aux diodes de récupération en antiparallèles ;
- le stockage d'énergie capacitive est plus aisé et efficace que son dual inductif. De plus, le cout et le poids des condensateurs sont moindres. [5]

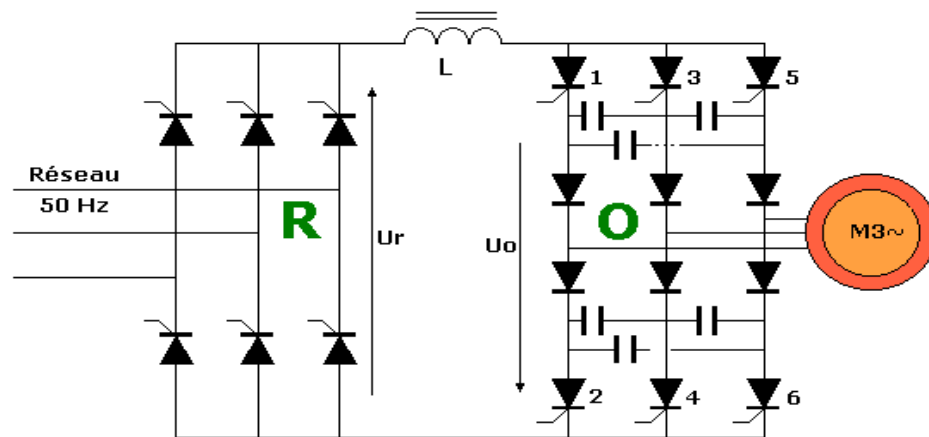


Fig. I.06 : Convertisseur avec onduleur de courant

#### I.4.2 onduleurs non autonome (assisté)

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif. [2]

#### I.5 Onduleur à résonance

Un onduleur à résonance est un onduleur qui fournit une énergie alternative nécessaire à l'entretien des oscillations à une charge constituée d'un circuit oscillant peu amorti, les interrupteurs sont commandés via une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge ,donc l'onduleur doit être piloté par la charge (jouer sur la fréquence de commande) ,est appelé aussi "onduleur moyenne fréquence", car sa fréquence est d'ordre nettement plus élevée que celle du réseau. On distingue deux types d'onduleur à résonance :

- l'onduleur série
- l'onduleur parallèle. [5]

#### I.6 principe de fonctionnement de l'onduleur

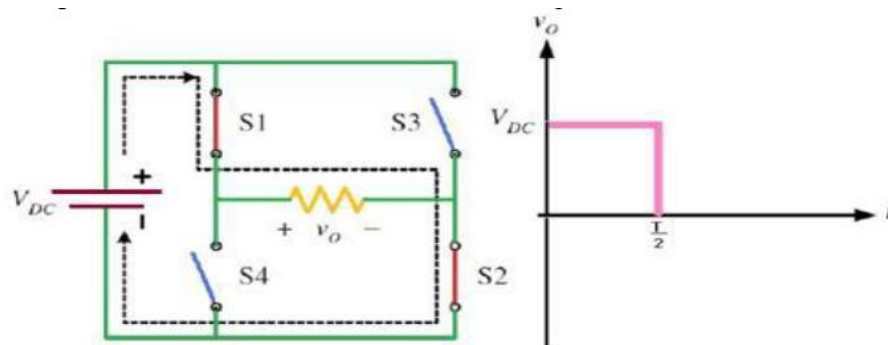
Le principe de fonctionnement d'un onduleur et basé sue l'électronique de commutation, on généré une onde de tension alternative à partir d'une tension continu. On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion :

- ✓ l'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la

fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

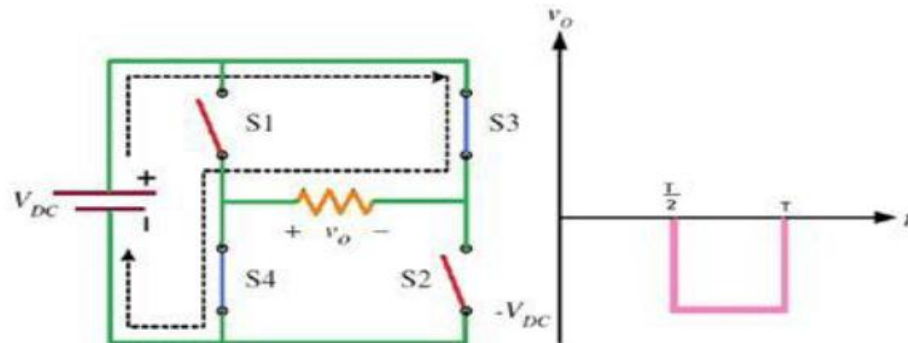
- ✓ contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Pour  $0 < t < T/2$ , S1 et S2 sont fermés (on), S3 et S4 sont ouverts (off) on obtient une alternance positive  $u(t) = V_{DC}$  comme la montre la **Fig. I.07** ci-dessous [3] :



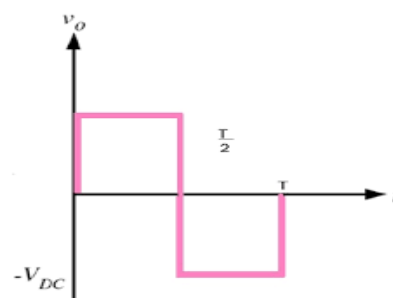
**Fig. I.07** : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1<sup>er</sup> demi cycle

Pour  $T/2 < t < T$ , S1 et S2 sont Ouverts (Off), S3 et S4 sont Fermés (On), on obtient une alternance négative  $U(t) = -V_{DC}$  comme la montre la **Fig. I.08**



**Fig. I.08** : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2<sup>ème</sup> demi cycle

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la **Fig. I.09** [2]



**Fig. I.09** : Signal complet de l'onduleur

## I.7 Utilisations des onduleurs

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé [6]

Les principales applications des onduleurs sont

### I.7.1 Alimentation de secours [7]

Elles sont destinées à remplacer le réseau de distribution (monophasé ou triphasé) en cas de défaillance de celui-ci .on les utilise dans les deux cas suivants :

- pour les installations qui nécessite la continuité de l'alimentation : hôpitaux, centraux téléphonique, circuits de sécurité.....
- Pour les appareils (ordinateurs...) qui exigent non seulement la continuité de leur alimentation mais encore la protection contre les perturbations du réseau de distribution : variation de tension, parasite coups de foudre...

Une alimentation de secours comporte trois parties principales :

- Un redresseur chargeur, alimenté par le réseau de distribution, constitué (selon la puissance) soit d'un pont à diode, suivi d'un hacheur, soit d'un pont commandé.
- Une batterie d'accumulateur (généralement en plomb) de quelques dizaines de volts.
- Un onduleur de fréquence 50 Hz qui délivre une tension parfaitement sinusoïdale.

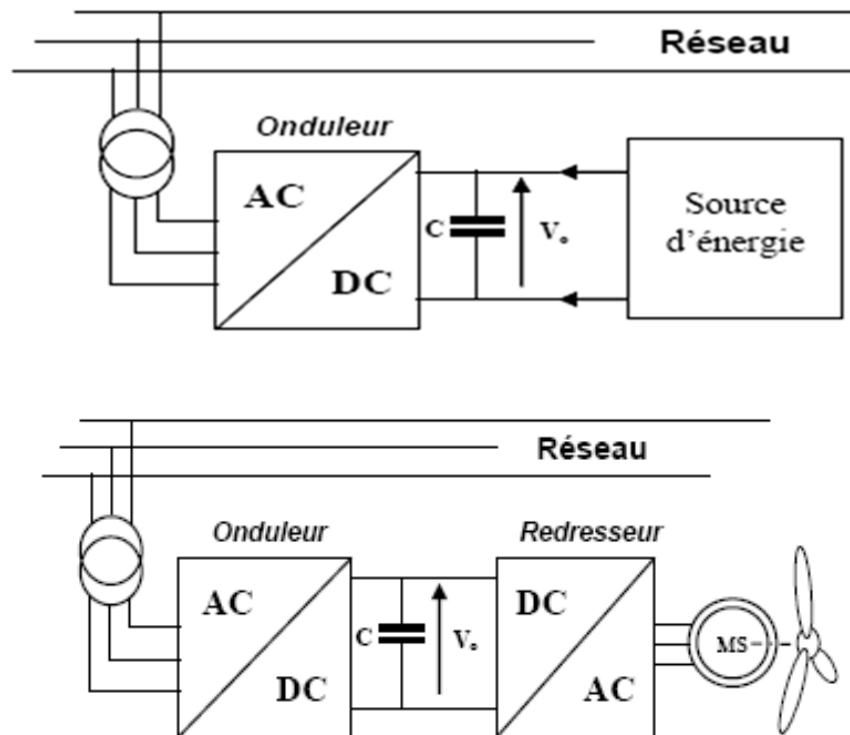


Fig. I.10 : Alimentation de secours

### I.7.2. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes [7]

Le transfert de puissance électrique entre différents pays est rendu possible grâce à l'utilisation de redresseurs et d'onduleurs. En effet plusieurs connexions entre réseaux existent à travers le monde, par exemple, la France fournit de l'énergie électrique à la Grande Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

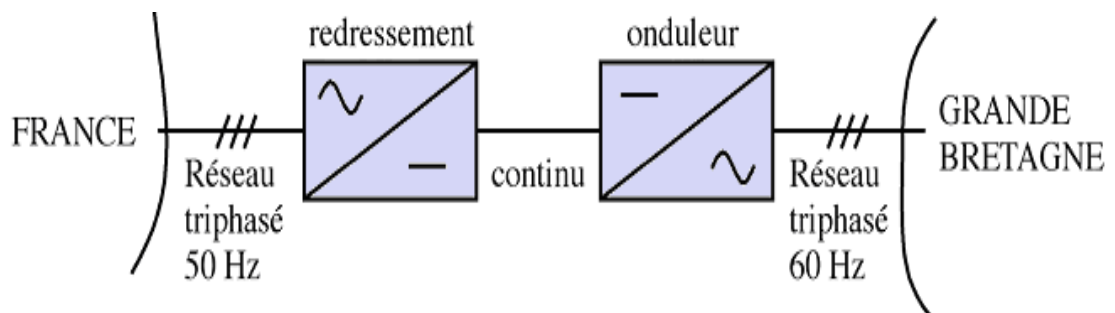


Fig. I.11 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

### I.8 Différent type de défaut affectant l'onduleur

Les défauts de l'onduleur consistent essentiellement dans le fonctionnement défectueux des composants de puissance et de la commande des semi-conducteurs.

## A. Les défauts des semi-conducteurs de puissance

Les onduleurs de tension utilisés par la traction ferroviaire utilisent essentiellement les thyristors GTO et, depuis peu, les IGBT.

La mise en défaut brutale du composant peut avoir plusieurs origines. Cependant, c'est essentiellement un phénomène thermique qui est la cause directe des destructions de composant, la température du silicium atteignant une valeur critique qui lui fait perdre ses capacités de semi-conducteur. [5]

## B. Les défauts de GTO se produisent

- **à l'ouverture** : remise en conduction du fait d'un taux de montée de la tension directe trop important ou échauffements localisés provoqués par la focalisation des lignes de courant.

- **à la fermeture** : si le taux de montée du courant est trop important et la gâchette et la cathode ne sont pas suffisamment interdigitées, il y a amorçage de seulement une partie de la cathode et donc un échauffement localisé se produit.

- **pendant la conduction** : si un surcourant circule pendant une durée ne respectant pas les critères de surcharge, il y a destruction thermique.

- **pendant l'état bloqué** : suite à une surtension, le composant est détruit par effet d'avalanche. Une circonstance aggravante est alors la température élevée du GTO.

Tous ces fonctionnements conduisent à une fusion du silicium : le thyristor GTO se comporte alors comme un interrupteur fermé idéal.

Les destructions de l'IGBT sont essentiellement dues à des surintensités, des surtensions ou des forts gradients de tension. Les mécanismes de destruction sont principalement la mauvaise dissipation des pertes et l'effet thyristor (dit "latching") qui consiste en amorçage incontrôlé du thyristor parasite inscrit dans la structure de l'IGBT.

A la différence du thyristor GTO, la destruction de l'IGBT en court-circuit est précédée par un régime de plateau durant lequel le courant est limité à une valeur fonction de la tension de gâchette, de la température et de la technologie ce régime de plateau peut être figuré par la caractéristique idéale d'un IGBT. [5]

### C. Les défauts d'un interrupteur IGBT (onduleur)

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

#### • Court-circuit

Le défaut de type court-circuit se produit lorsqu'un des interrupteurs d'un bras reste constamment fermé. Un tel défaut peut avoir deux causes : soit la mise en court-circuit physique de la puce de silicium (IGBT ou diode) par dépassement de température critique, soit la défaillance de la commande raccordée. Plus de la moitié des défaillances d'un semi-conducteur arrivent par l'application d'un signal de commande erroné ou parasité .Ce dysfonctionnement de commande provoque une saturation en courant d'un des deux transistors d'un bras, en fonction du signe et de la valeur du courant sans protection, le défaut apparait dans le premier transistor peut diffuser au transistor complémentaire. La cellule de commutation se retrouve alors en court-circuit. Cette situation est très critique car la source d'alimentation se retrouve donc directement en court-circuit avec la cellule de commutation. Ce type de défaillance est extrêmement préjudiciable au convertisseur et nécessiterait la mise en œuvre de protection permettant de déconnecter le bras défaillant dès l'apparition de cette défaillance. La mise en place de disjoncteurs électroniques rapides intégrés au driver et au plus près du composant est une solution envisageable pour éviter cette situation critique. Néanmoins, la présence de ce type de protection ne permet pas de sécuriser l'ensemble de la chaîne de conversion. Donc l'isolement de deux des trois pôles de la cellule défaillante est nécessaire afin d'assurer la continuité de service lors d'une défaillance interne ou externe au convertisseur. La fonctionnalité disjoncteur intégrée au composant n'est donc plus suffisante, des organes d'isolement supplémentaires doivent être insérés (fusibles, sectionneurs passifs, discontacteur (contacteur-disjoncteur) mécanique ou disjoncteur électronique dans les phases en série avec la charge). [4]

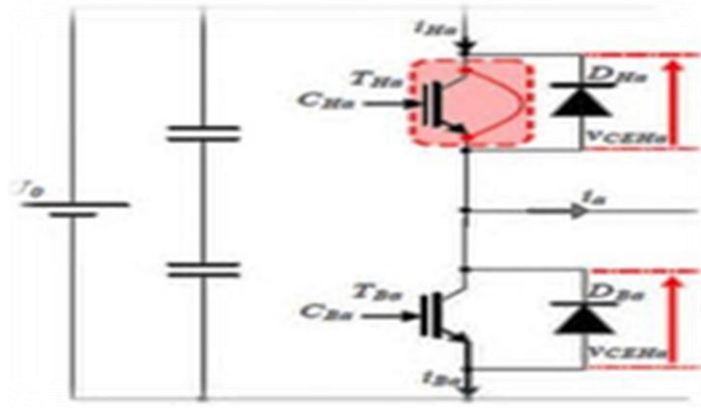


Fig. I.12 : Court-circuit sur un interrupteur

### • Circuit ouvert

Le défaut de type circuit ouvert apparaît lorsqu'un des interrupteurs (IGBT) d'un bras reste constamment ouvert. La cause principale de ce type de défaut est la commande rapprochée (défaut thermique du driver ou perte d'alimentation par exemple). Selon la localisation du défaut dans la cellule, celui-ci sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur interrupteur supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut sur interrupteur inférieur). La conséquence est que la cellule défaillante se retrouve alors en surtension et qu'un arrêt du convertisseur est obligatoire pour éviter une propagation du défaut. La défaillance de la commande de grille (alimentation, driver ou grille du composant incluant son interconnexion) peut être à l'origine d'un mode de défaillance de type haute impédance

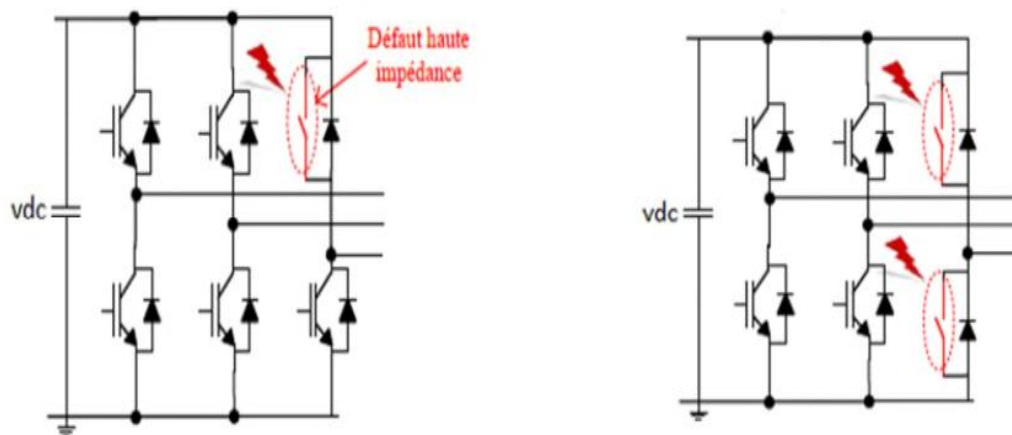
Cette défaillance peut survenir sur un ou deux des interrupteurs de la cellule :

- Défaillance de type haute impédance sur un transistor (**Fig. I-13-a**) : l'interrupteur se retrouve donc en circuit ouvert, entraînant une perte de réversibilité du courant (seule la diode reste fonctionnelle). Dans le cas d'un fonctionnement en onduleur, cette perte de réversibilité cause l'absence d'une alternance du courant de phase. Par conséquent, la phase est connectée au potentiel négatif du bus d'entrée par l'intermédiaire de la diode de l'interrupteur homologue, dans le cas où le transistor supérieur de la cellule reste ouvert et que le courant dans la phase correspondante est positif.

- Défaillance de type haute impédance des deux transistors de la cellule (**Fig. I-13-b**) : Ce mode de défaut correspond en particulier à la perte de la commande de l'ensemble de la cellule. C'est le cas d'une carte driver à deux voies et la défaillance de l'alimentation de la carte. La cellule de commutation en défaut n'est plus connectée qu'à travers les diodes.



La conduction spontanée d'une des diodes de la cellule en défaut dépend des courants développés par la cellule de filtrage et des commandes des cellules restantes. [4]



(a) Défaillance haute impédance sur un transistor.

(b) Défaillance haute impédance sur un bras

**Fig. I.13 : Défaut de circuit ouvert**

## I.9 Les méthode d'analyse des défauts

Il y a plusieurs méthodes existantes pour le diagnostic des défauts et la protection des transistors bipolaires avec l'accent spécial de ceux utilisés dans les C/S. Vingt et une méthodes pour des défauts de circuit ouvert et dix méthodes pour le court-circuit, basées sur leurs performances, et des efforts de mise en œuvre, on cite parmi ces méthodes.

### I.9.1 Méthode d'analyse spectrale

Le traitement du signal est depuis de nombreuses années utilisé pour détecter des défaillances électriques. L'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels.

Dans cette méthode, le spectre actuel est analysé pour détecter les caractéristiques d'un transistor ouvert en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFD) qui est une base majeure de la physique et des mathématiques.

Son principe repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent. C'est une intégration qui permet de passer de l'espace du temps à celui des fréquences.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{I.01})$$

Si le signal  $x(t)$  est périodique, la décomposition en série de Fourier permet de calculer l'amplitude des raies de son spectre soit  $x(t)$  un signal de période :  $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

Le mathématicien Fourier à démontré que la fonction  $x(t)$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$X(t) = X_0 + C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + C_N \sin(N\omega t + \varphi_N) \quad (\text{I.02})$$

Donc  $X_0$  est la valeur moyenne de  $(t)$  :  $X_0 = \langle x \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt$

$C_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  : est le fondamental de  $x(t)$ , sa pulsation est :  $\omega = 2\pi f$  ; son amplitude est  $C_1$

$C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2)$  : est l'harmonique de rang 2, sa pulsation est  $2\omega$ , son amplitude est  $C_2$ .

$C_N \sin(N\omega t + \varphi_N)$  : est l'harmonique de rang  $N$ , sa pulsation est, son amplitude est  $C_N$ .

Cette décomposition peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$X(t) = X_0 + A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + \dots \quad (\text{I.03})$$

$$+ A_N \cos(N\omega t) + B_N \sin(N\omega t)$$

Avec :

$$A_N = \frac{2}{T} \int x(t) \cdot \cos(N\omega t) \cdot dt \quad (\text{I.04})$$

Et :

$$B_N = \frac{2}{T} \int x(t) \cdot \sin(N\omega t) \cdot dt \quad (\text{I.05})$$

Les deux écritures de la décomposition en série de Fourier d'une fonction périodique du temps sont équivalentes, et on a les correspondances :  $\varphi_N = \tan^{-1}\left(\frac{B_N}{A_N}\right)$

Si la fonction du temps  $x(t)$  qui décrit le signal est connu, la TF permet de calculer l'équation  $S(f)$  de la courbe du spectre. C'est une intégration qui permet de passer de l'espace du temps à celui des fréquences :

$$S(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{I.06})$$

C'est un nombre complexe dont le module donnera  $S(f)$ .

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal. Des logiciels spécifiques ont été développés pour faciliter les calculs numériques : ils utilisent des langages interprétés optimisés pour les calculs matriciels intensifs et des outils graphiques de simulation, ces logiciels contiennent des centaines de fonctions mathématiques. Ils possèdent des structures de données sophistiquées [8]

### I.9.2 La méthode vectorielle de Park(Concordia)

Cette méthode concerne la structure de l'onduleur de deux niveaux triphasé. Dans cette technique, la détection des défauts de circuit ouvert et la localisation du transistor défaillant sont effectuées en calculant le module et l'angle du vecteur de Park dont l'expression obtenue avec la transformation de Concordia. Les courants et les tensions biphasés sont donnés par l'expression suivante : [9]

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{I.07})$$

- **Elaboration du vecteur courant**

Supposons que le système est équilibré,

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{I.08})$$

Appliquons ensuite la transformation de Concordia:

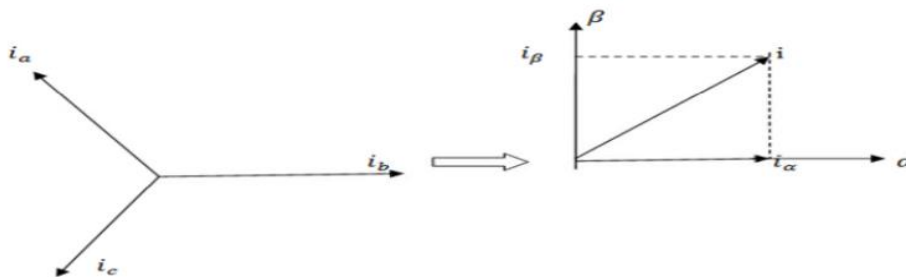


Fig. I.14 Transformation de Concordia

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right] \quad (\text{I.09})$$

$$i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right] \quad (\text{I.10})$$

Dans le domaine complexe:

$$\bar{I} = i_\alpha + i_\beta \quad (\text{I.11})$$

L'opérateur de rotation:

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{I.12})$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{I.13})$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{I.14})$$

$$\bar{I} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ i_a + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_b + \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_c \right] \quad (\text{I.15})$$

$$\bar{I} = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_a + a i_b + a^2 i_c] \quad (\text{I.16})$$

Pour un système normal, la valeur de l'amplitude est zéro et la trajectoire vectorielle spatiale est un cercle. Remplaçons  $a$  et  $a^2$  par ces expressions et prenons en compte l'expression:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

On trouve:

$$i_\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} i_a \quad (\text{I.17})$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} i_a + \sqrt{2} i_b \quad (\text{I.18})$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

Dans ce cas, le contour de Park est un cercle centré à l'origine. Ce contour est considéré comme un indice de référence simple et intéressant dans la mesure où ces déviations indiquent les anomalies pouvant affecter la machine

- **Trajectoire du vecteur courant en régime sain**

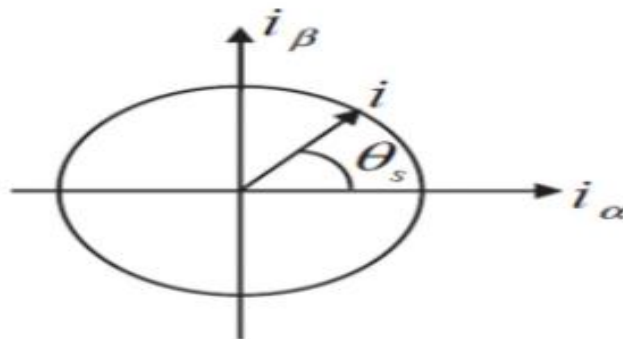


Fig. I.15 : Position du vecteur courant

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

$$\psi = \frac{i_{\alpha k} - i_{\alpha k-1}}{i_{\beta k} - i_{\beta k-1}} \quad (\text{I.20})$$

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

- **Cas d'étude [10]**

### 1. Phase A en défaut : interrupteur ouvert

Dans le cas de défaut dans la phase A; avec le même raisonnement T1 ou T4 ouvert: les équations (I.17), (I.18) et (I.20) nous donnent et :  $\psi = \infty$  et  $i_\alpha = 0$  et  $i_\beta = \sqrt{2}i_b$

(a)

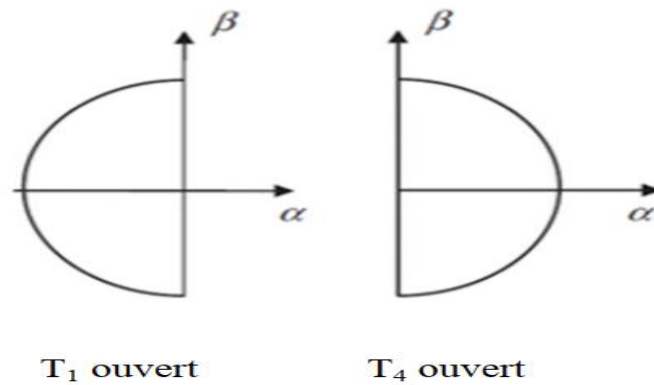


Fig. I.16 Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T1 et T4 en défaut

## 2. Phase B en défaut : interrupteur ouvert

Si T2 ou T5 est ouvert : le courant de la phase B est nul pendant une demi-période du courant. Les équations (I.17), (I.18) et (I.20) nous donnent et :  $\psi = \sqrt{3}$  et  $i_\alpha = \sqrt{3}i_\beta$

(b)

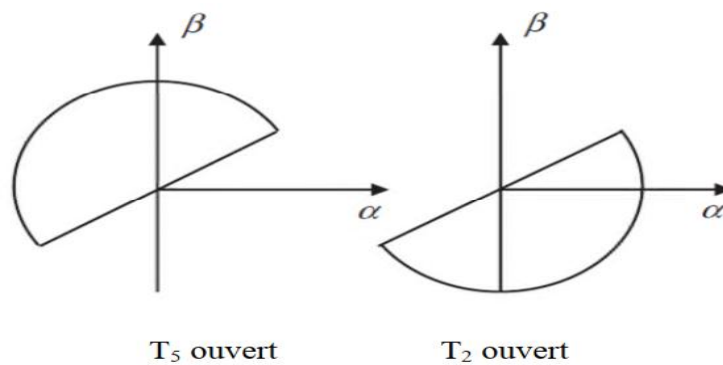
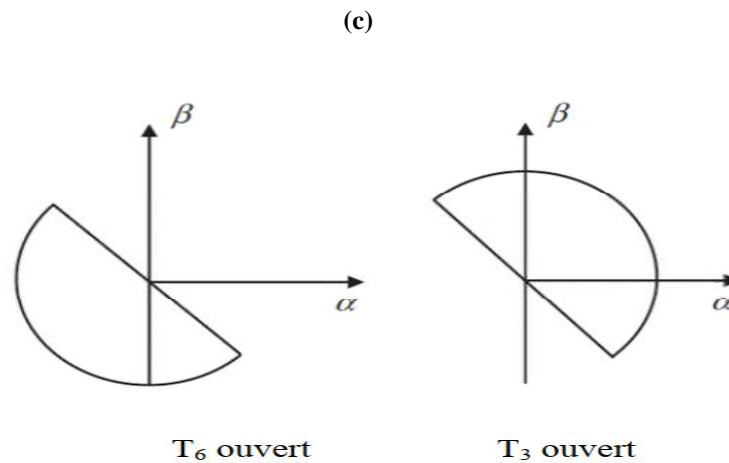


Fig. I.17 Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T2 et T5 en défaut

## 3. Phase C en défaut : interrupteur ouvert

- Le défaut concerne la phase C, dans ce cas T3 ou T6 ouvert, il vient que :

$$\psi = -\sqrt{3} \text{ et } i_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} i_\alpha \text{ D'où } i_\alpha = -\sqrt{3}i_\beta$$



**Fig. I.18** Formes de trajectoire du courant de phase (forme de Lissajous) : T3 et T6 en défaut

L'observation de la trajectoire des contours de Park **Fig. (I.16, I.17, I.18)**, nous observeront que le rapport  $\psi$  est constant pendant la moitié de la période et égale à une des constantes mentionnées auparavant ( $\sqrt{3} - \sqrt{3} \infty$ ) Par conséquent, le bras défectueux dans l'onduleur peut être localisé en évaluant la valeur de cette constante  $\psi$ .

### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie des onduleurs, leur constitution physique élémentaire, leur fonctionnement, leurs principales applications et nous avons présenté les défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de l'onduleur

Deux méthodes ont été présentées dans ce chapitre pour le diagnostic et la localisation de défauts des semi-conducteurs défaillants dans l'onduleur, la première méthode l'analyse spectrale et la seconde approche méthode concerne l'analyse de la trajectoire du contour de Park afin de détecter et localiser les défauts dans semi-conducteurs .La deuxième méthode étudiée va être développée et simulée dans l'environnement MATLAB (Sim Power System) dans le chapitre suivant.

## II.1 Introduction

Actuellement un grand axe de recherches est orienté vers la surveillance de l'état du convertisseur statique. En effet, un convertisseur tel que l'onduleur est susceptible de présenter des défauts structurels tels que les défauts d'ouverture des interrupteurs à semi-conducteurs et par conséquent ce type de dysfonctionnement peut induire des endommagements pour le système de production si le personnel n'est pas averti et qu'un arrêt intempestif ne soit produit. Puisque, l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade de défaut ; il est donc évident, que l'investissement dans le domaine de la détection des dysfonctionnements paraît une solution incontournable.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'onduleur de tension contrôlés par la technique de la commande à modulation à largeur d'impulsion (MLI) et l'application d'une approche dédiée à la détection et au diagnostic des défauts dans l'onduleur, cette approche est basée sur l'analyse du contour de Park du courant de charge.

## II.2 Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

L'onduleur de tension est le convertisseur le plus utilisé pour l'alimentation des machines alternatives. Sa structure en pont constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance) ou des thyristors GTO, C'est le cœur de l'organe de commande des machines alternatives. Il peut être considéré comme un amplificateur de puissance, est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. [6]

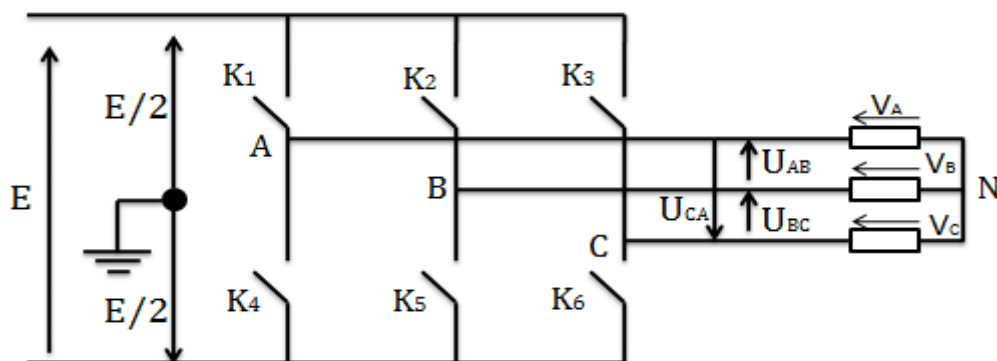


Fig. II.01 : Onduleur triphasé à deux niveaux



Quelque soit les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A,B,C et le point milieu O de la source de tension continue[3] :

$V'_A - V_O$  égale  $E/2$ , quand  $K_1$  est fermé et  $-E/2$  quand  $K'_1$  fermé.

$V'_B - V_O$  égale  $E/2$ , quand  $K_2$  est fermé et  $-E/2$  quand  $K'_2$  fermé.

$V'_C - V_O$  égale  $E/2$ , quand  $K_3$  est fermé et  $-E/2$  quand  $K'_3$  fermé.

D'où on peut déduire les tensions entre les bornes de sortie :

$$\begin{cases} U_{BA} = (V'_A - V_O) - (V'_B - V_O) \\ U_{CB} = (V'_B - V_O) - (V'_C - V_O) \\ U_{AC} = (V'_C - V_O) - (V'_A - V_O) \end{cases} \quad (\text{II.01})$$

On a dans un système triphasé équilibré :

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ Entraîne } V_A + V_B + V_C = 0$$

On peut donc écrire :

$$V_A = -V_B - V_C \quad (\text{II.02})$$

$$3V_A = (V_A - V_B) + (V_A - V_C)$$

$$V_A = \frac{2}{3}(V'_A - V_O) - \frac{1}{3}(V'_B - V_O) - \frac{1}{3}(V'_C - V_O)$$

En procédant de manière identique pour les autres phases, on obtient :

$$\begin{cases} V_B = -\frac{1}{3}(V_A - V_O) + \frac{2}{3}(V_B - V_O) - \frac{1}{3}(V_C - V_O) \\ V_C = -\frac{1}{3}(V_A - V_O) - \frac{1}{3}(V_B - V_O) + \frac{2}{3}(V_C - V_O) \end{cases} \quad (\text{II.03})$$

Donc la tension de sortie de l'onduleur est donnée par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.04})$$

### II.3 Différentes techniques de contrôle d'un onduleur de tension

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteur ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation à largeur d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de modulation à largeur d'impulsions ont été proposées, on distingue:

- **Commande par modulation sinus – triangle:** est basée sur la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire.

- **Commande par MLI Vectorielle :** La modulation vectorielle appelée encore MLI régulière symétriques dans les quelles les angles de commutation sont calculés en ligne

Le choix d'une technique dépend du type de machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettent d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques de MLI

Dans ce qui va suivre, nous détaillons la première technique qui serait exploitée: [6]

### II.4 Commande par modulation sinus – triangle

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse Width Modulation, ou Modulation à Largeur d'Impulsion) consiste juste en la comparaison, ou sens électronique du terme, d'un signal sinusoïdal <de consigne> avec une <porteuse> triangulaire de fréquence supérieur permettant de fixer par là même la fréquence de commutation, et ainsi la bande de fréquence occupée par le contenu harmonique Dans le cadre d'onduleur triphasé, la commande PWM n'est pas vraiment plus compliquée. Le signal triangulaire qui constitue la porteuse reste unique et les trois signaux de commande sont simplement obtenus par sa comparaison à trois sinusoïdes de consigne déphasées de  $120^\circ$ [3]

Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle de l'onduleur est donné comme suit :

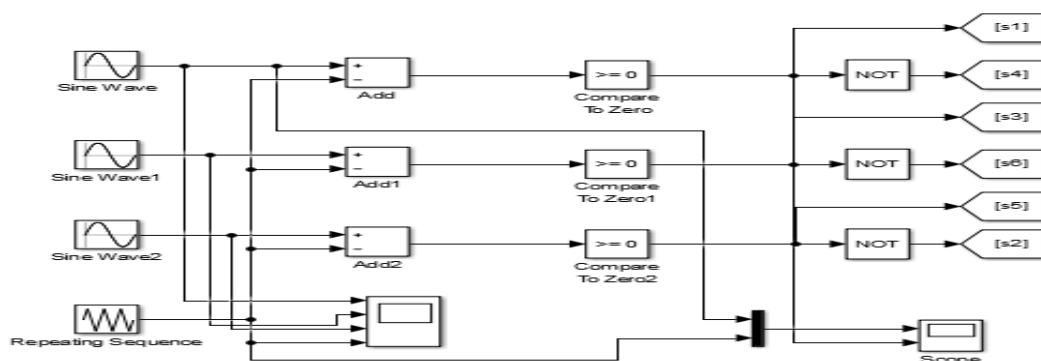


Fig. II.02 : Schéma de principe de la technique MLI

La détermination des instants des commutations dans le cas d'un MLI est donnée par la Fig. II.03

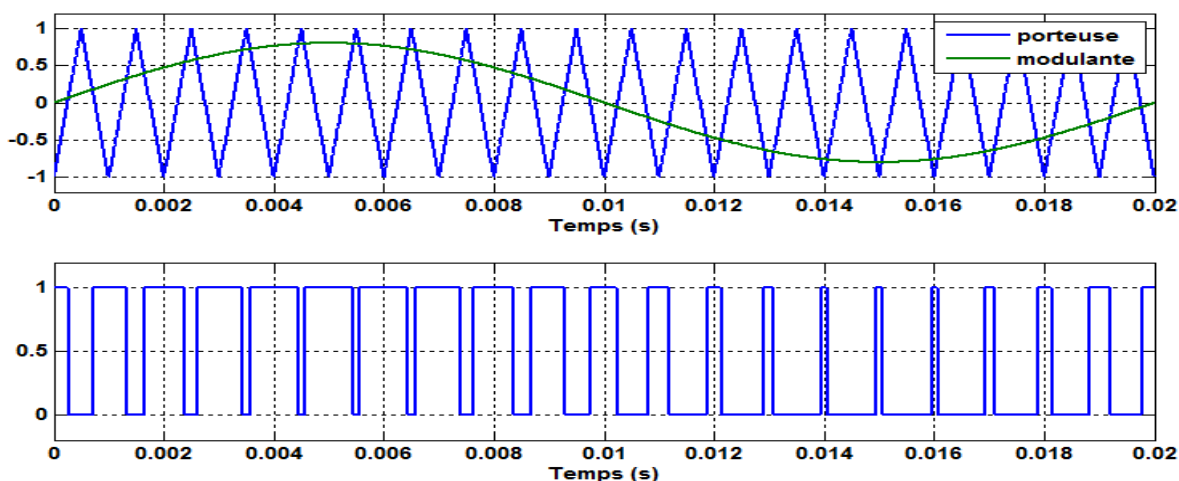


Fig. II.03 : Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI

## II.5 Objectifs de la technique MLI [5]

Les objectifs principaux d'une MLI sont les suivants :

- Obtenir dans la charge électrique des courants dont la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composants alternatifs d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie larges variables.

## II.6 Caractéristique de la commande MLI[3]

- **L'indice de modulation "m"** :c'est le rapport entre la fréquence de signal de la porteuse  $f_p$  et la fréquence de signal de référence  $f_s$  .

$$m = \frac{f_p}{f_s} \quad (\text{II.05})$$

- **Coefficient de réglage "r"** :c'est le rapport entre l'amplitude de référence  $V_r$  et l'amplitude de la porteuse.

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{II.06})$$

En système triphasé équilibré toujours la phase entre les trois tensions est  $2\pi/3$  d'amplitude fixe et fréquence fixe :

$$\begin{cases} V_{r1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{r2} = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{r3} = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (\text{II.07})$$

Le principe de cette stratégie peut être résolu par l'algorithme suivant :

$$\text{Si } V_r \geq V_p \text{ } S_i = 1 \text{ } i = [1,2,3]$$

$$\text{Sinon } S_i = 0$$

Fin

## II.7 Simulation de l'onduleur avec la commande MLI

### II.7.1 Cas de fonctionnement sain de l'onduleur avec la commande MLI

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel «MATLAB Simulink», pour la simulation présentée par la suite est réalisée sur un onduleur triphasé de à deux niveaux commandé selon le principe de la **MLI**. Avec une valeur de tension continue **DC=400V** générée par un redresseur triphasé, dont la fréquence de la porteuse  $f_p=3\text{KHz}$ . L'onduleur alimente une charge **RL** ( $L=2\text{mH}$ ,  $R=5\Omega$ ). Dans cette simulation, nous avons utilisé un filtre passif dont  $L=800\mu\text{H}$  et  $C=400\mu\text{F}$ , la méthode de calcul numérique utilisée est l'approche d'Euler avec un pas de calcul fixe, de  $h=1\text{e-6s}$  et un temps de simulation de 0.2s.

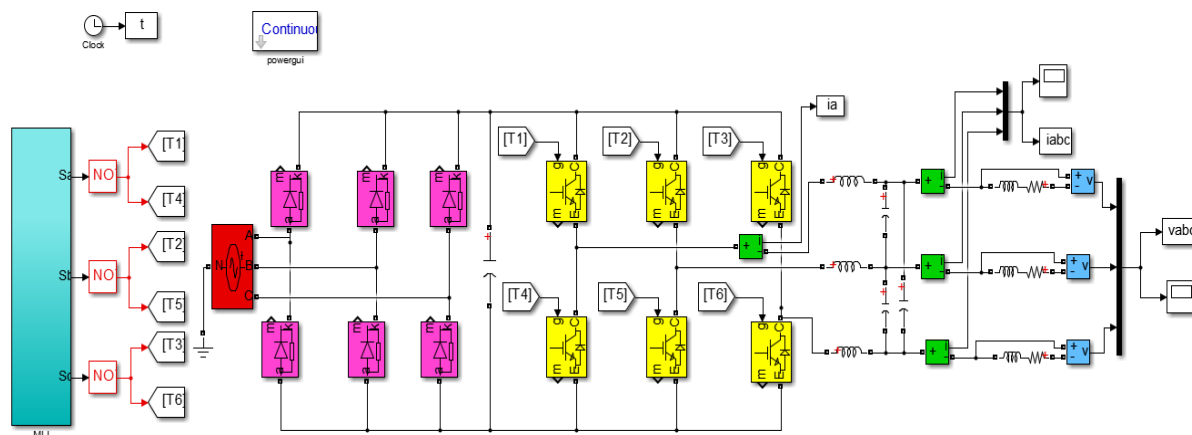


Fig. II.04 : Modèle de simulation de l'onduleur avec la commande MLI en absence de défaut (sain)

Résultats de simulation

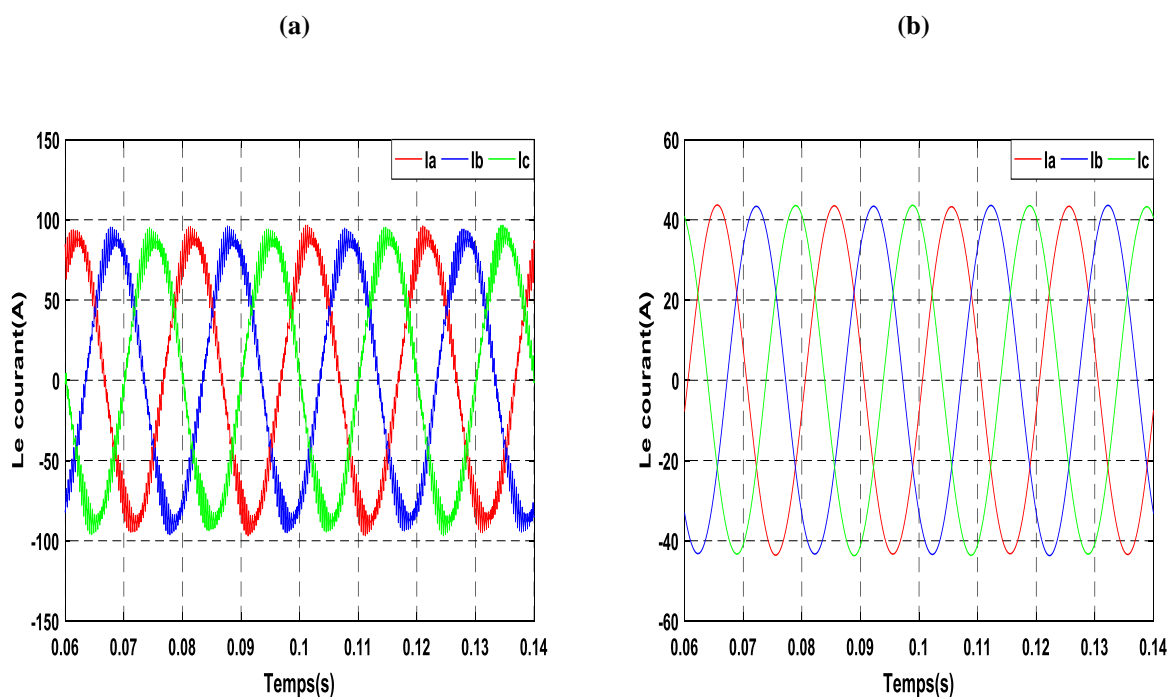


Fig. II.05 : Simulation de l'onduleur en absence de défaut (sain), (a) Les courant Iabc a la sortie de l'onduleur, (b) Les courant Iabc filtrés de la charge

D'après les résultats de simulation de l'onduleur à deux niveaux en absence de défaut la Fig. II.05 (a) et (b) représentent respectivement les courant  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  de la charge sans filtre et les courant de la charge avec filtre. On voit que les courants ont une forme sinusoïdale et on remarque que des oscillations apparaissant dans les courants de charge avant le filtre ce qui les perturbent Fig. II.05(a) Ces oscillations peuvent être réduites grâce à un filtre introduit, composé d'inductances en série associées à des capacités entre phases Fig. II.05(b)

### II.7.2 Cas de fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert de l'onduleur avec une commande MLI

D'une manière générale, le régime de défaut de circuit-ouvert pour n'importe quel mode est obtenu par le blocage de l'IGBT du bras de la phase concernée par le défaut à l'état ouvert ( $S_i=0$ )

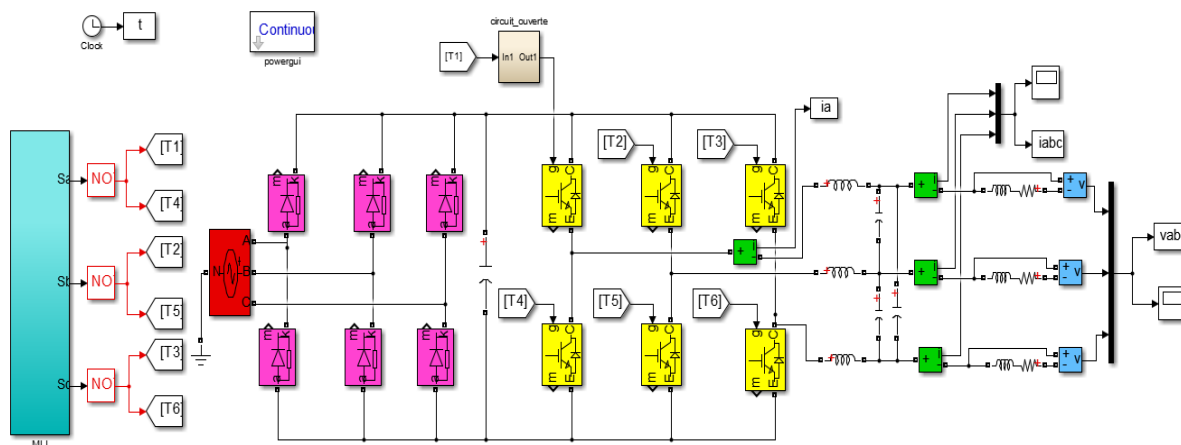


Fig. II.06 : Modèle de simulation de l'onduleur en présence de défaut (circuit ouvert)

Dans le but de visionner l'influence des défauts de circuit ouvert sur les grandeurs électriques, on essaye de le créer dans les différents interrupteurs.

#### Résultats de simulation

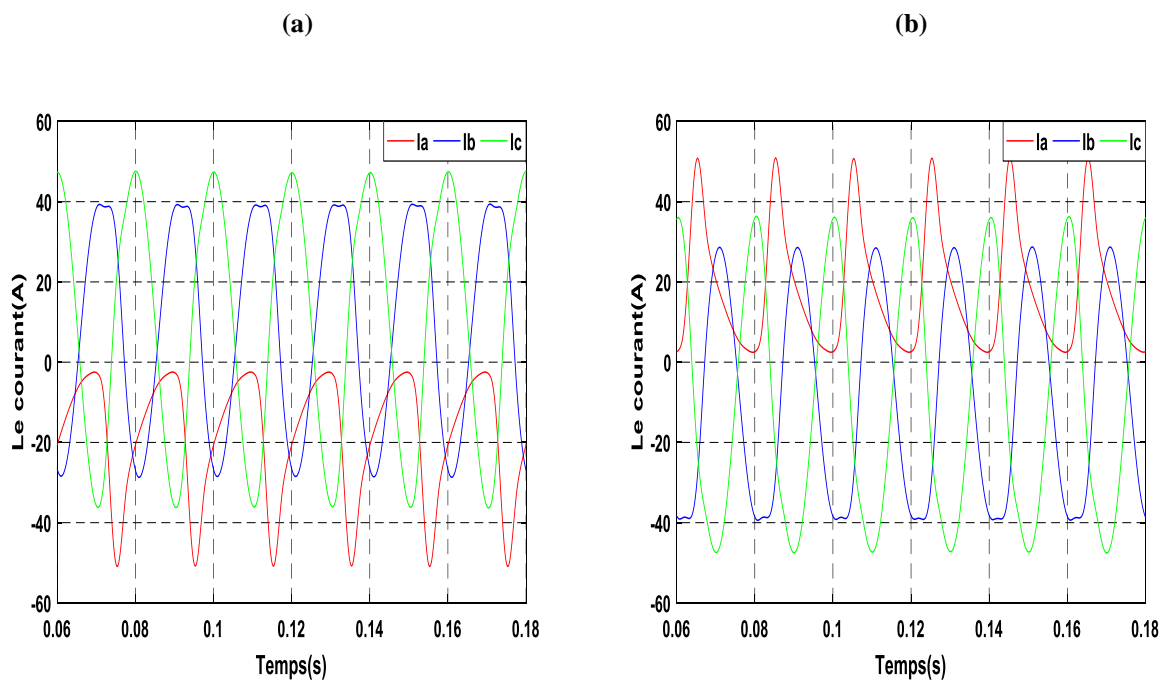


Fig. II.07 : Les courant iabc en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T1 et (b) l'interrupteur T4

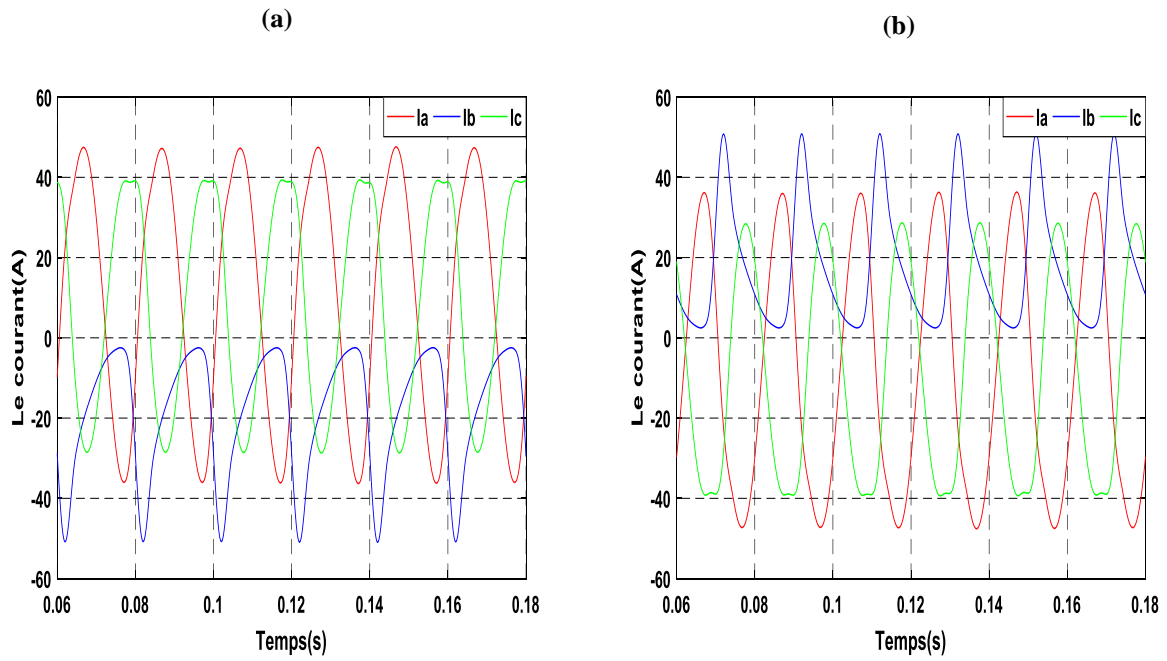


Fig. II.08 : Les courants  $i_{abc}$  en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T2 et (b) l'interrupteur T5

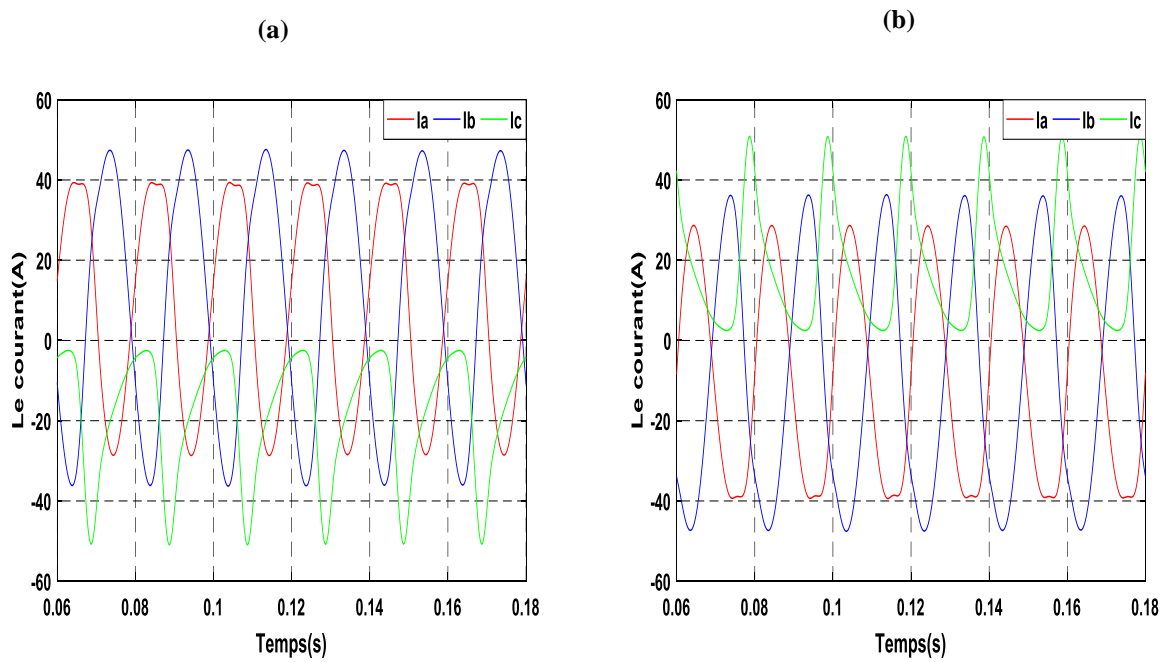
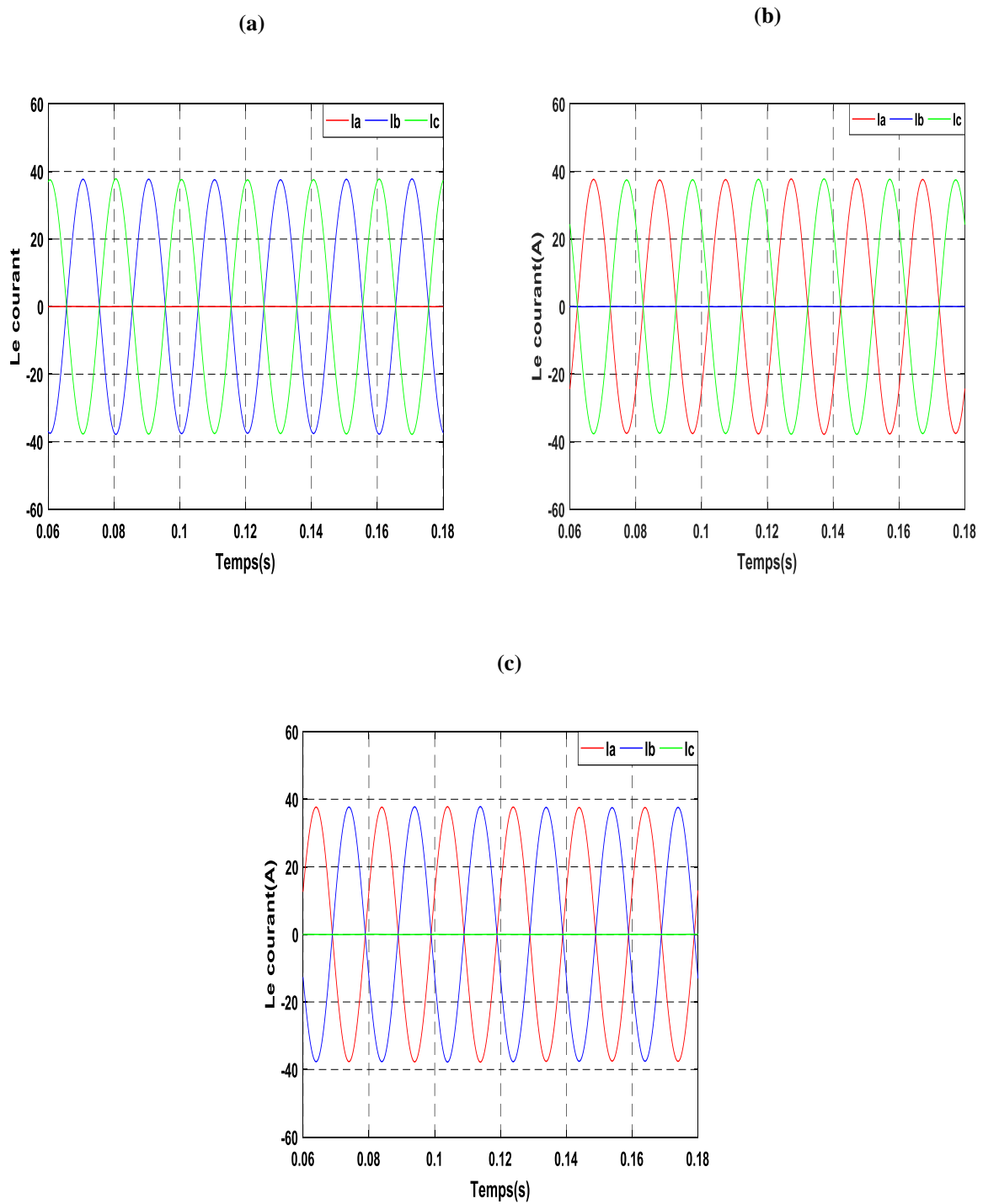


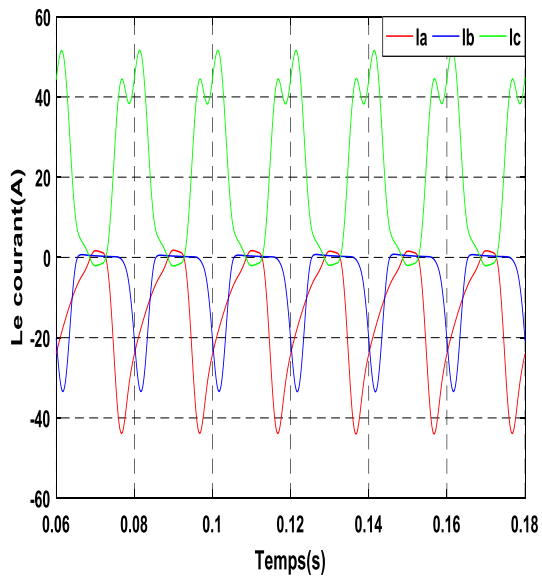
Fig. II.09 : Les courants  $i_{abc}$  en présence de défaut dans les interrupteurs (a) l'interrupteur T3 et (b) l'interrupteur T6



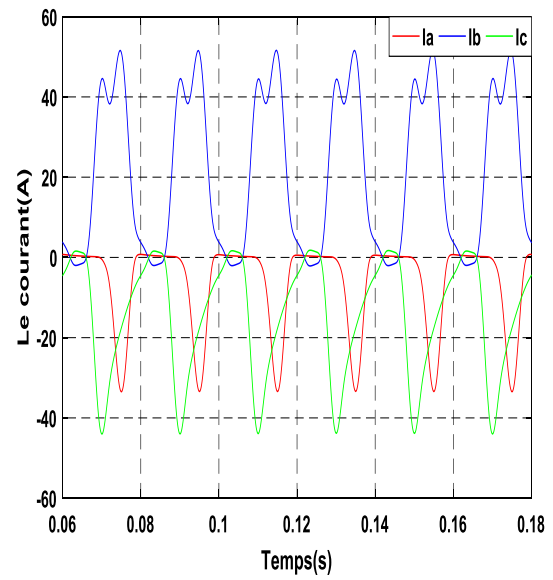
**Fig. II.10 : Les courants  $i_{abc}$  de la charge en présence de défaut dans le premier bras de l'onduleur (a) ,le 2ème bras (b) et le 3ème bras (c)**



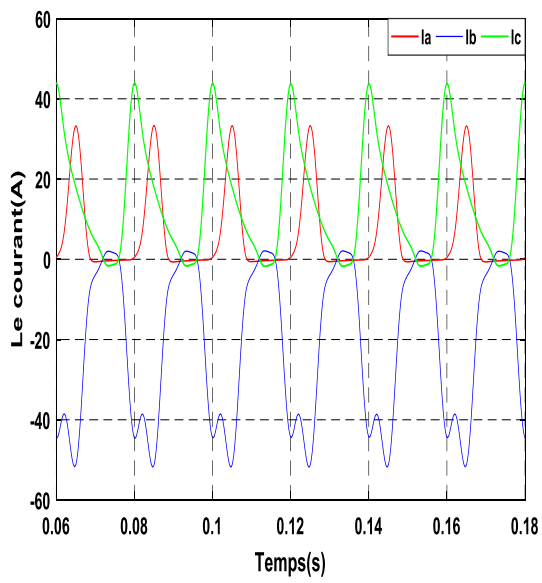
(a)



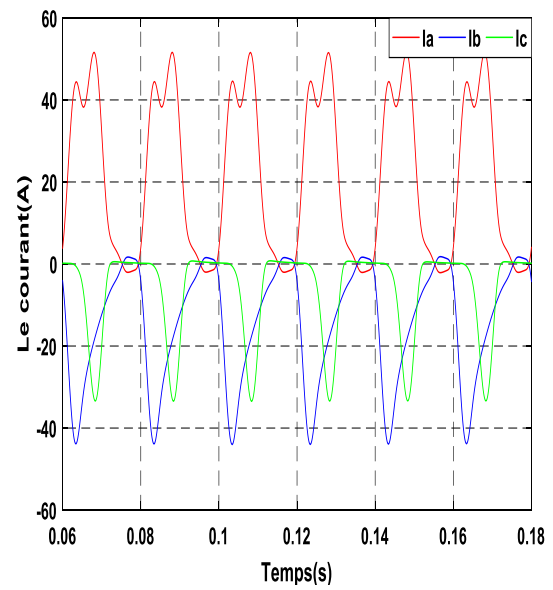
(b)

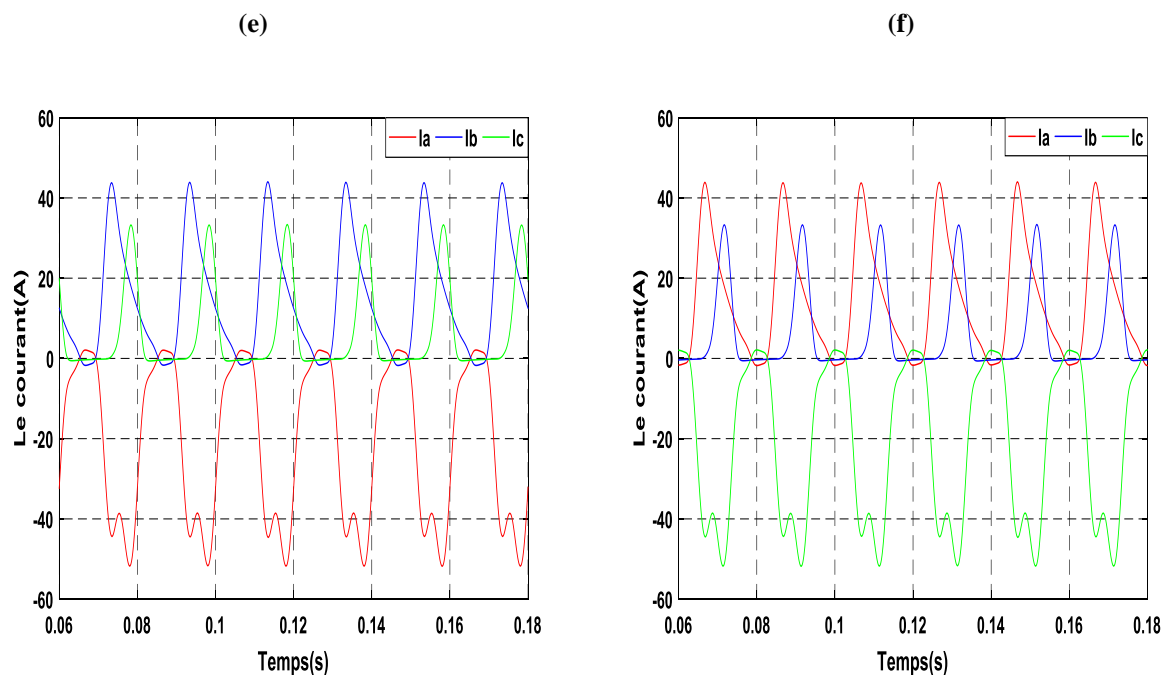


(c)



(d)





**Fig. II.11** : Les courants  $I_{abc}$  de la charge en présence de défaut dans les interrupteurs (a) T1&T2 , (b) T1&T3,(c) T4&T5 , (d) T2&T3 , (e) T5&T6 et (f) T4&T5

- Les résultats de simulations obtenues dans les **Fig. (II.07,II.08 et II.9)** représente les courants  $I_{abc}$  en présence de défauts de circuit ouvert ce type de défaut consiste à la mise en ouverture de l'un des interrupteurs de premier bras(T1 ou T4) **Fig. II.07** 2ème bras(T2 ou T5) **Fig. II.08** et le 3ème bras (T3 ou T6) **Fig. II.9**, cela conduit à éliminer l'alternance positive ou négative du courant de phase de ce bras L'absence de cette alternance du courant de phase "a" revient à la connexion de la phase au potentiel négatif de tension d'entrée par l'intermédiaire de la diode de l'interrupteur T4 (semi-conducteur complémentaire à T1 )**Fig. II.07** Par ailleurs, les courants  $I_b$  et  $I_c$  sont affectés aussi par ce défaut. En revanche, avec l'ouverture de T4, le courant  $I_a$  est invisible sur l'alternance négative, à l'opposé, il est visible sur l'alternance positive. De même, pour les cas de défauts d'ouverture des interrupteurs des deux autres bras. **Fig. (II.08 et II.9)**

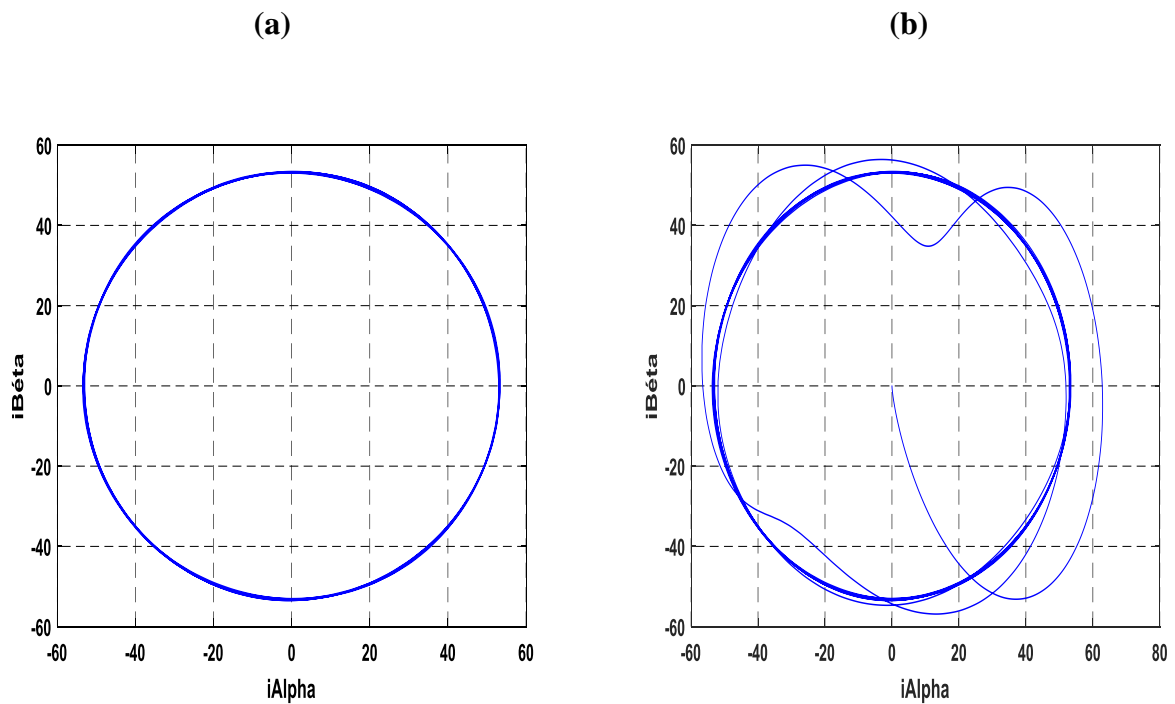
- Dans le cas où le défaut est créé dans les deux interrupteurs du même bras (**Fig. II.10**), on remarque que l'annulation du courant de la phase défectueuse et une augmentation importante de l'amplitude du courant des deux autres phases

- Dans le cas où le défaut est créé dans les interrupteurs : (a) T1&T2, (b) T1&T3, (c) T4&T6, (d) T2&T3 , (e) T5&T6 et (f) T4&T5 (**Fig. II.11**) , d'où les courants de phases devient fortement déséquilibrés. Ce défaut provoque des perturbations dans le système

Parmi plusieurs méthodes de diagnostic, on a choisi la technique basée sur l'analyse du courant : c'est la technique de Contour de PARK

## II.8 Analyse avec le Contour de PARK

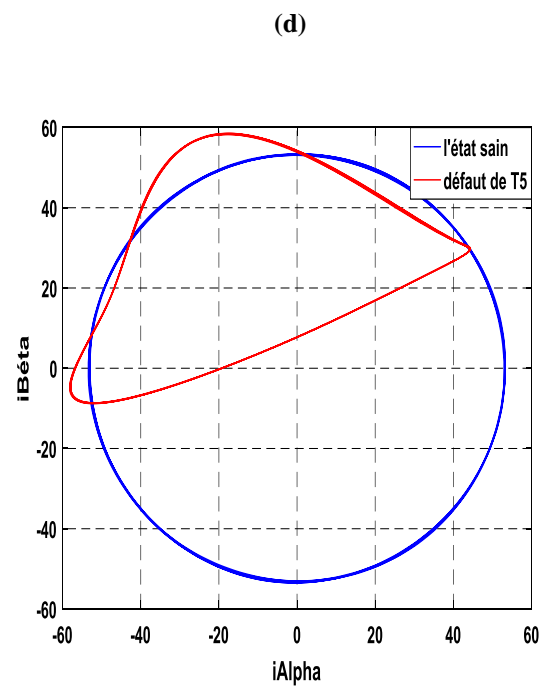
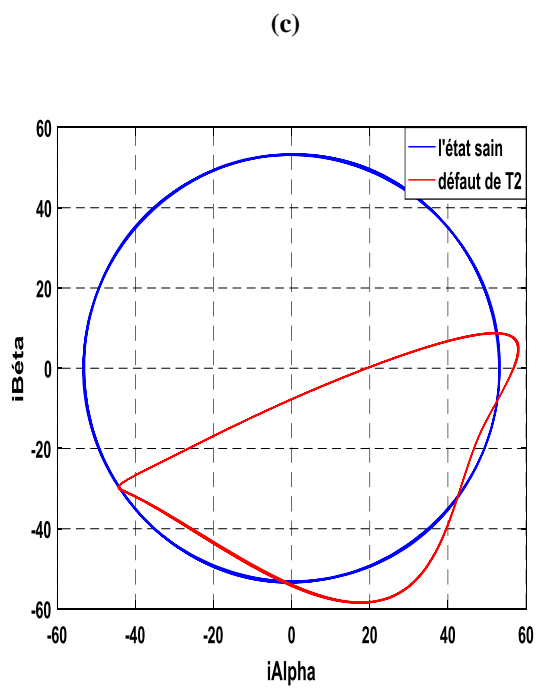
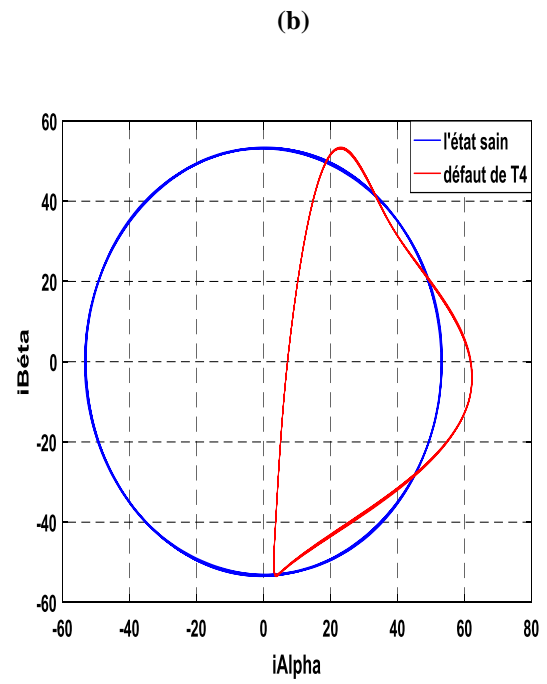
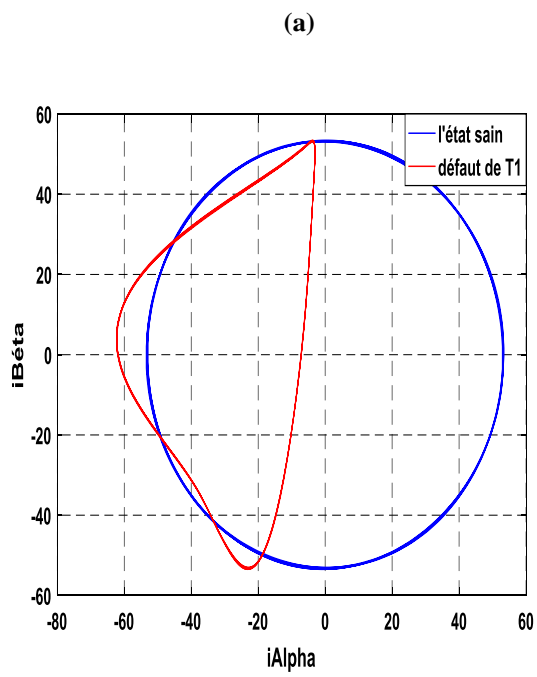
Pour le cas de fonctionnement sain on obtient les figures ci-dessous pour cette analyse :

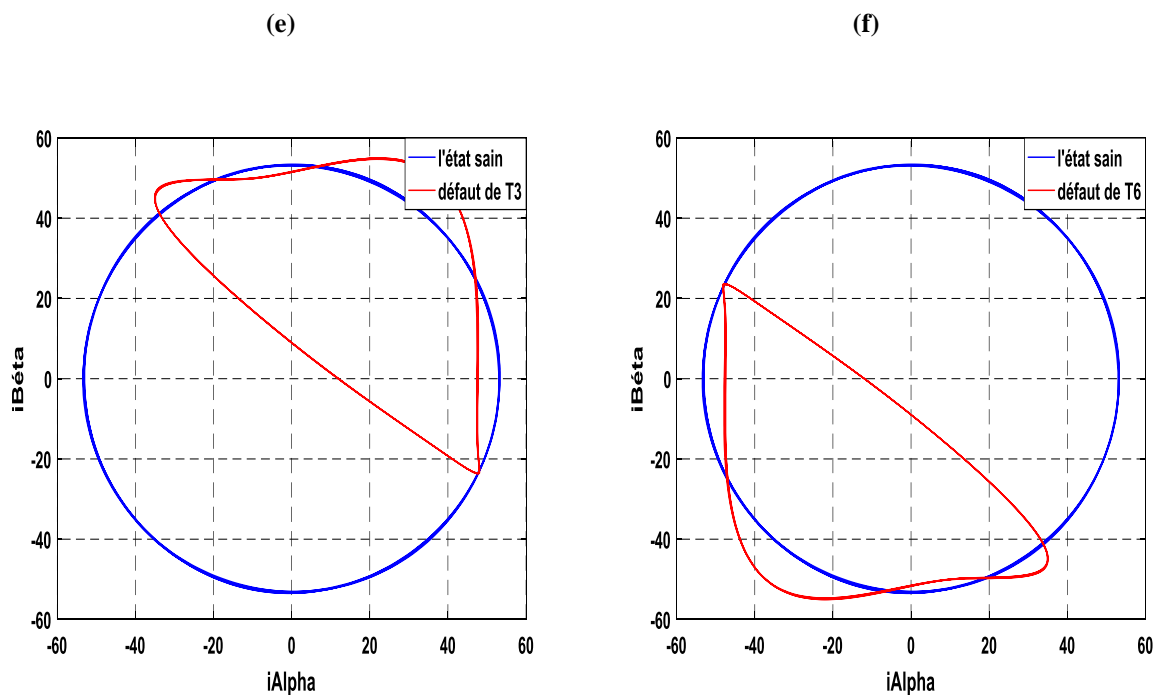


**Fig. II.12 : Analyse du contour de Park dans le cas d'un fonctionnement sain :(a) Régime permanent et (b) Régime permanent et transitoire**

On voit que la forme de contour de Park est une forme circulaire, Ce cercle représente la forme de Lissajous en régime permanent et en régime transitoire

Les figures ci-dessous présentent les formes du contour de Park pour un défaut d'ouverture d'un des deux semi-conducteurs du même bras (**Fig. II.13**), deux semi-conducteurs de bras différents en même temps (**Fig. II.14**) et dans le cas où le défaut est créé dans 02 interrupteurs de 02 bras différents (**Fig. II.15**).



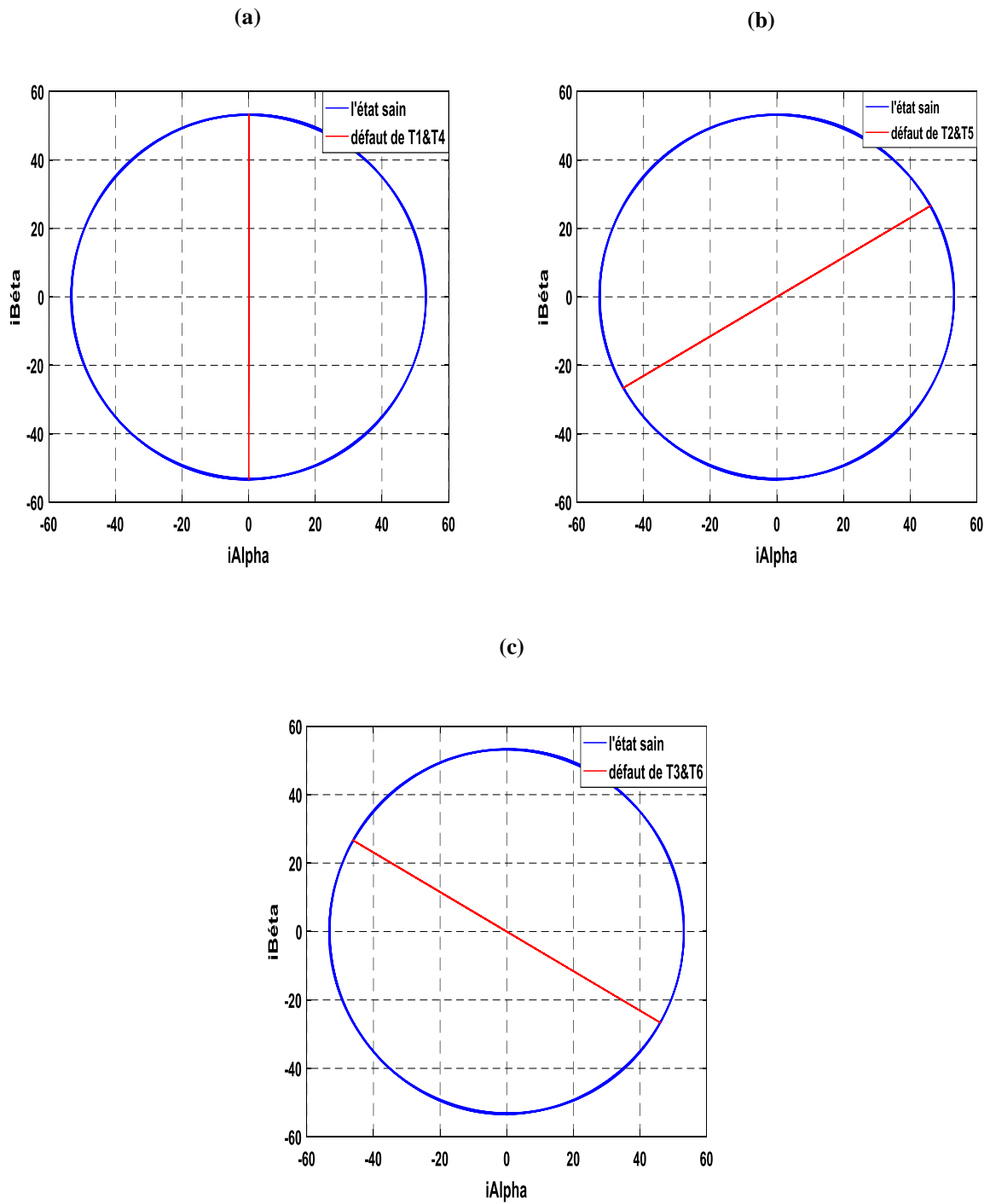


**Fig. II.13 : Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert dans les interrupteur (a)T1, (b)T2, (c)T3, (d)T4, (e)T5 et (f)T6**

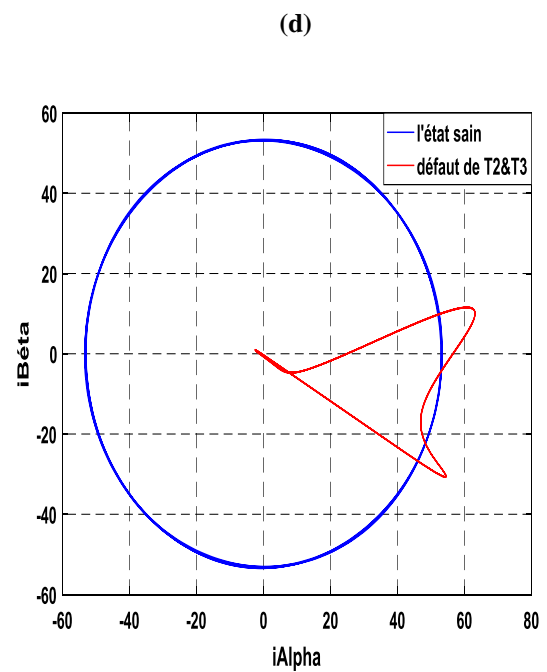
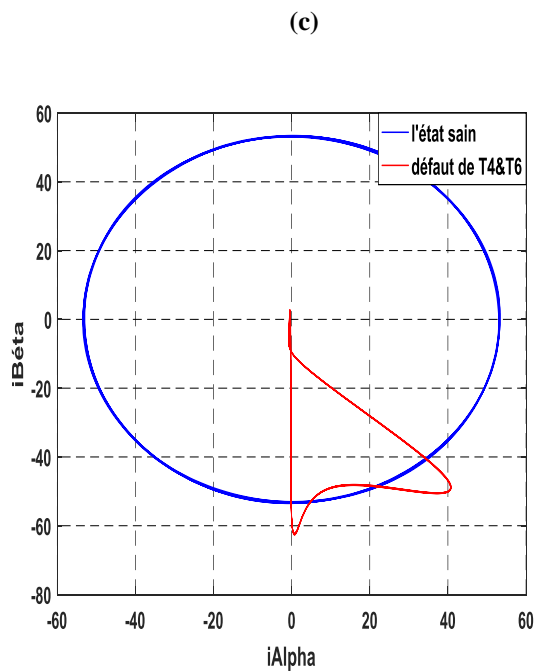
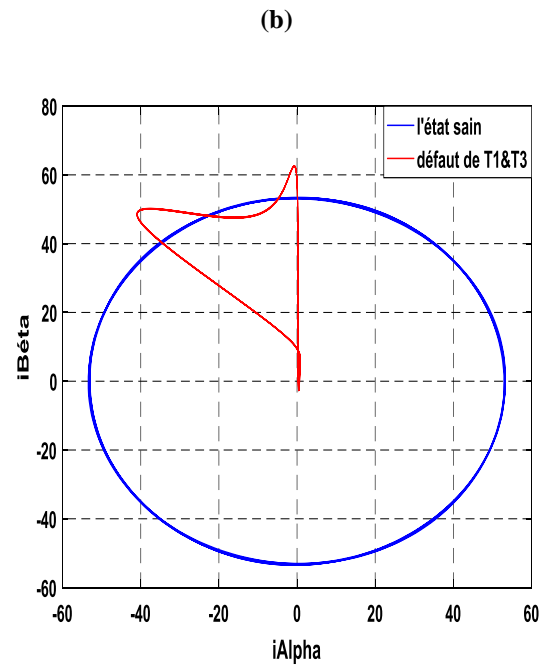
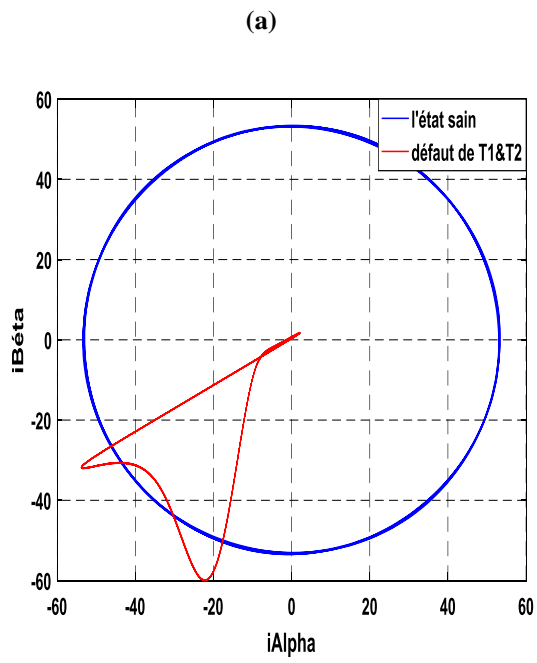
On peut voir l'effet du dysfonctionnement sur la position de contour de Park. Dans le cas d'ouverture de T1, le contour se déplace avec un angle de "90°". Par contre, pour le cas d'un défaut d'ouverture de T4, le contour se déplace avec un angle de "-90°" (**Fig. II.13-a et -b**).

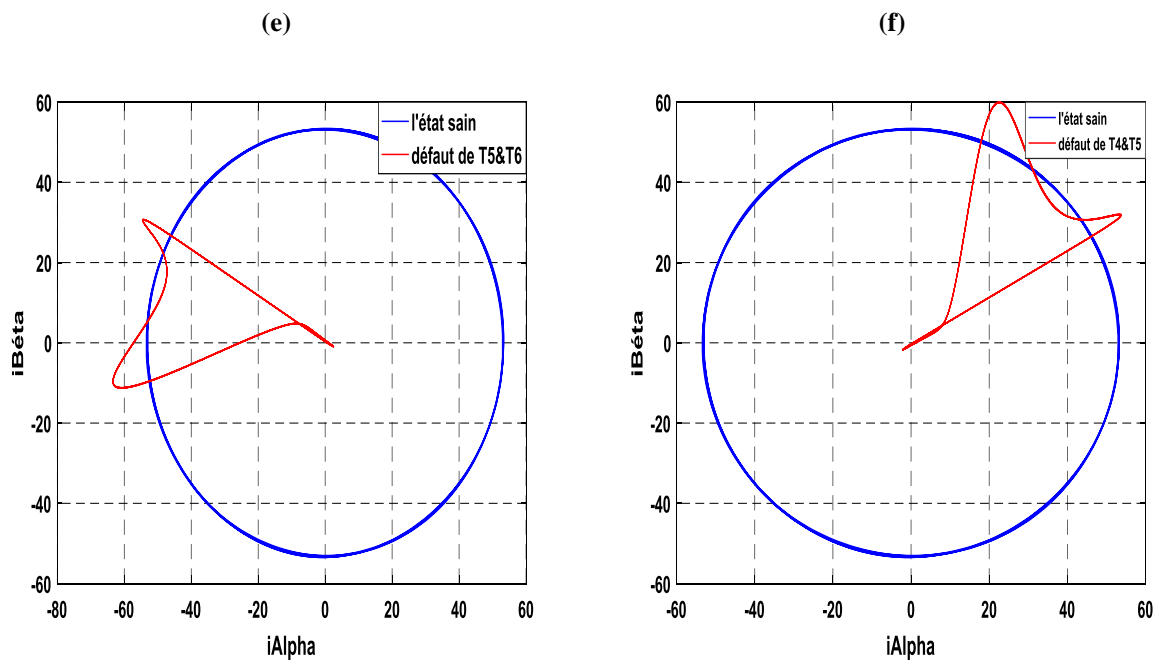
De même, pour les cas de défaut d'ouverture des interrupteurs (T2 et T5), une rotation de "30°" du contour de Park localise l'ouverture de T2. Le sens opposé présente la déviation par un angle de "-150°" du reste de la demi-période du contour de Park (pour le cas d'ouverture de T5, (**Fig. II.13-c et -d**).

Pour le dernier bras, on observe que si T3 est défectueux, le contour de Park fait une rotation de "150°", et change sa position avec un angle de "-30°" lorsque T6 est ouvert (**Fig. II.13-e et -f**).



**Fig. II.14** : Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert dans : (a) le premier bras, (b) le 2<sup>ème</sup> bras et(c) le 3<sup>ème</sup> bras





**Fig. II.15 :** Analyse du contour de Park en présence de défaut de circuit ouvert dans 02 interrupteurs de 02 bras différents : (a) T1&T2, (b) T1&T3, (c)T4&T6, (d) T2&T3, (e)T5&T6 et (f) T4&T5

Nous remarquons que le défaut de circuit ouvert dans tous les cas provoque une augmentation de l'épaisseur de la forme de Lissajous du contour du cercle ce qui permet d'établir un diagnostic de défaut en effectuant une surveillance des déviations de ce cercle par rapport au modèle de base.

La **Fig. II.15** illustre les différentes formes de trajectoire de courant de phase relatives à chaque deux interrupteur en défaut, dans ce cas il y six défauts possibles, si une défaillance de périphérique de commutation se produit, le vecteur actuel prendra une forme individuelle différente de son état d'origine. Cette forme dépend du commutateur dans lequel le défaut est survenu, la forme des défauts est l'intersection entre les formes engendrées de deux interrupteurs en défaut.

L'évaluation du rapport  $\psi$  (ou  $\text{Arctg } \psi$ ) constitue un bon moyen de diagnostic et détection de défaut dans le convertisseur.



## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Après la création d'un défaut de circuit ouvert on a proposé une méthode de diagnostic basée sur l'analyse de la trajectoire du contour de Park afin de détecter et localiser les défauts dans les interrupteurs de l'onduleur à MLI (sinus triangle). L'analyse de contours de Park est un outil efficace pour le diagnostic et la localisation de défaut des semi-conducteurs défaillants.

### III.1 Introduction

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) constituent à ce jour une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. De façon formelle, un RNA est une fonction mathématique associant à des entrées, des grandeurs de sortie à l'aide de paramètres ajustables appelés des poids. Grâce au processus d'apprentissage, les (RNA) sont des approximateurs universels parcimonieux capables d'estimer un modèle complexe avec une précision voulue. Ils réalisent à la fois des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage.

Nous commençons donc ce chapitre, en premier lieu, par un historique sur les RN, nous présenterons ensuite les définitions essentielles, nous expliquerons ce qu'est un neurone formel, ce qu'est un réseau de neurones et ce que c'est l'apprentissage des RN.

Ensuite, nous allons appliquer les RNA pour la détection des différentes défaillances qui peuvent surgir sur l'onduleur.

### III.2 Historique

Dans les premiers travaux, en 1943, J. Mac Culloch et Walter Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique. Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique). En 1949, Donald Hebb complète ces travaux en introduisant une formulation du mécanisme d'apprentissage, sous la forme d'une règle de modification des connexions synaptiques.

Les premiers succès de cette discipline remontent à 1957, lorsque F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance des formes. Notons qu'à cette époque les moyens à sa disposition étaient limités et c'était une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes. C'est alors qu'en 1960, l'automaticien Widrow développe le modèle Adaline (Adaptive Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient qui est très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons Multi Couches. M. Minsky et S. Papert publient ensuite en 1969 un ouvrage qui met en évidence les limitations théoriques du Perceptron. Ces limitations concernent l'impossibilité de traiter des problèmes non linéaires en utilisant ce modèle. Le renouveau de cette discipline reprend en 1982 grâce à J. J. Hopfield.

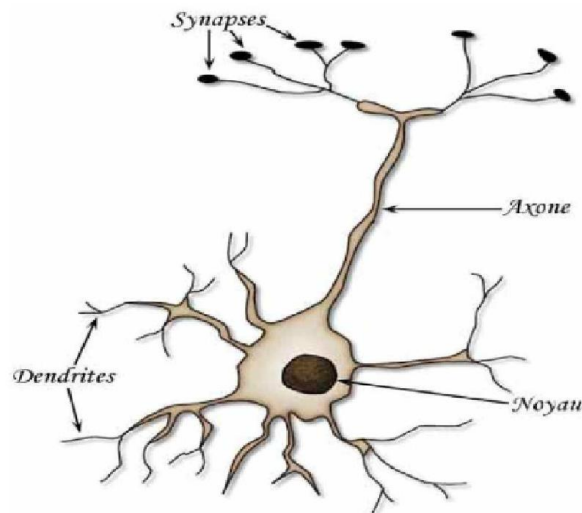
Au travers d'un article court, il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones. C'est ensuite qu'en 1985 la rétro-propagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté au Perceptron Multi Couches. Sa découverte est réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants. Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau, en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. [11]

### III.3 Réseaux de neurones : définitions et propriétés

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes sont fondés sur des modèles qui tentent de mimer les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions. Le but, d'un point de vue global, est d'exécuter des calculs complexes et de trouver, par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres. [12]

#### III.3.1 Neurone biologique

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux, il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux. Le neurone biologique (**Fig. III.01**) est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones sont des cellules nerveuses décomposables en 4 parties principales. Les dendrites, sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique : c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux. Le corps de la cellule ou noyau, c'est l'unité de traitement. L'axone est la partie où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule. Enfin, à la sortie du neurone on trouve les synapses, par lesquelles la cellule communique avec d'autres neurones, ce sont des points de connexion par où passent les signaux de la cellule.



**Fig. III.01 : Exemple de neurone biologique**

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action, à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule. Au point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions sont converties en signaux chimiques. Quand l'accumulation des excitations atteint un certain seuil d'activation, le neurone engendre un potentiel d'action, pendant une durée de 1ms. Le neurone émettant le signal est appelé neurone pré-synaptique et celui recevant ce signal, neurone post-synaptique.

### III.3.2 Neurone formel

Le neurone formel **Fig.III.02** est une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même « valeur » (les connexions entre les neurones étant plus ou moins fortes), les chercheurs ont donc créé un algorithme qui pondère la somme de ses entrées par des poids synaptiques (coefficients de pondération). En général, un neurone formel est un élément de traitement possédant  $n$  entrées

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie  $y_i$  le résultat d'une fonction de seuillage  $f$  (dite aussi la fonction d'activation) de la somme pondérée. [14]

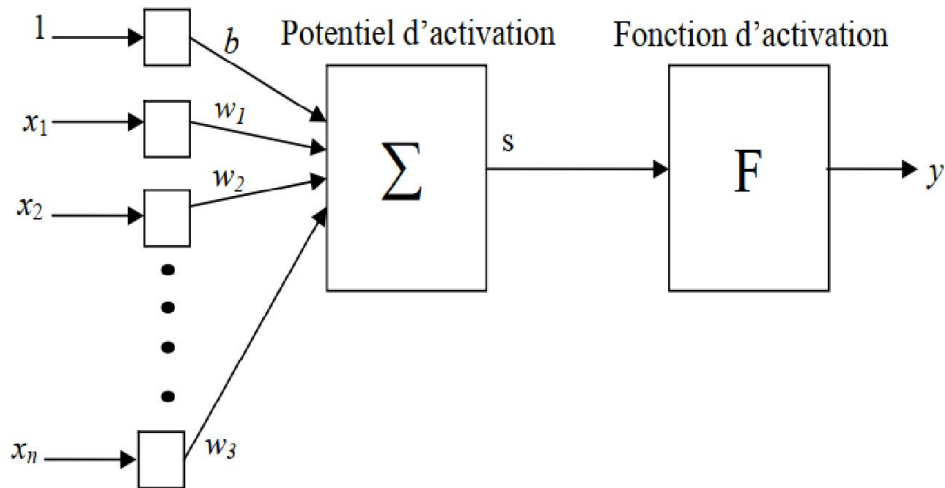


Fig. III.02 : Modèle d'un neurone formel

Avec :

- Les  $x_i$  sont les entrées du réseau ;
- $S$  est le potentiel d'activation ;
- Les  $w_i$  représentent les poids synaptiques ;
- $y_i$  La sortie du réseau tels que  $y = f(s)$ ;  $s = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i + b$

### III.4 Fonction d'activation

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non linéarité dans le fonctionnement du neurone. Les fonctions de seuillage présentent généralement trois intervalles: [15]

- En dessous du seuil, le neurone est non actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou 1).
- Aux alentours de seuil, une phase de transition
- Au-dessus du seuil, le neurone est actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 1).

Dans sa première version, le neurone formel était implémenté avec une fonction à seuil, mais de nombreuses versions existent. Ainsi, le neurone de McCulloch et Pitts a été généralisé de différentes manières, en choisissant d'autres fonctions d'activations, comme les fonctions énumérées dans le tableau III.01. Les trois fonctions les plus utilisées sont les fonctions « seuil », « linéaire », « sigmoïdes ».

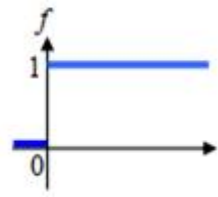
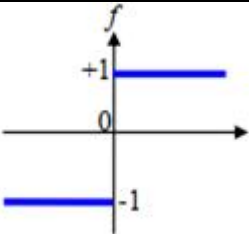
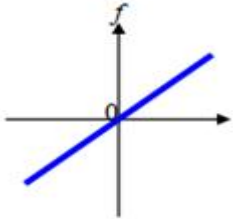
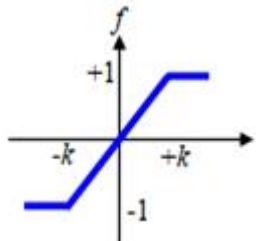
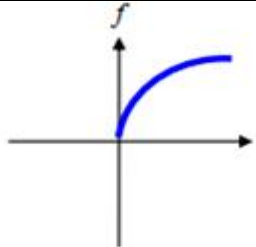
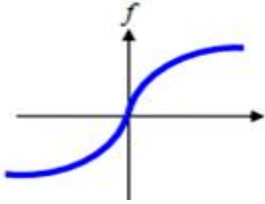
Catégorie	Type	Equation	Allure
Seuil	Binaire (Heaviside)	$f(x) = 1$ si $x < 0$ $f(x) = 0$ si $x \leq 0$	
	Signe	$f(x) = 1$ si $x > 0$ $f(x) = -1$ si $x \leq 0$	
Linéaire	identité	$f(x) = x$	
	Saturation	$f(k, x) = -1$ si $x < -K$ $f(k, x) = 1$ si $x > k$ $f(k, x) = kx$ sinon	
Sigmoide	Positive (logistique)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{kx}}$	
	Symétrique (type tanch)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}} - 1$	

Tableau III.01 : Fonction de transfert

### III.5 Architecture des réseaux de neurones

L'architecture est la manière avec laquelle les neurones sont interconnectés afin de constituer un réseau. On peut distinguer trois types d'architectures de réseaux de neurones [16]:

- **Les réseaux non bouclés ou réseaux unidirectionnels (feedforward networks)** ont leurs neurones organisés sous la forme d'une ou de plusieurs couches successives. L'information circule de la couche d'entrées vers la couche de sortie à travers d'éventuelles couches intermédiaires mais sans retour en arrière. Le Perceptron adopte ce type d'architecture.

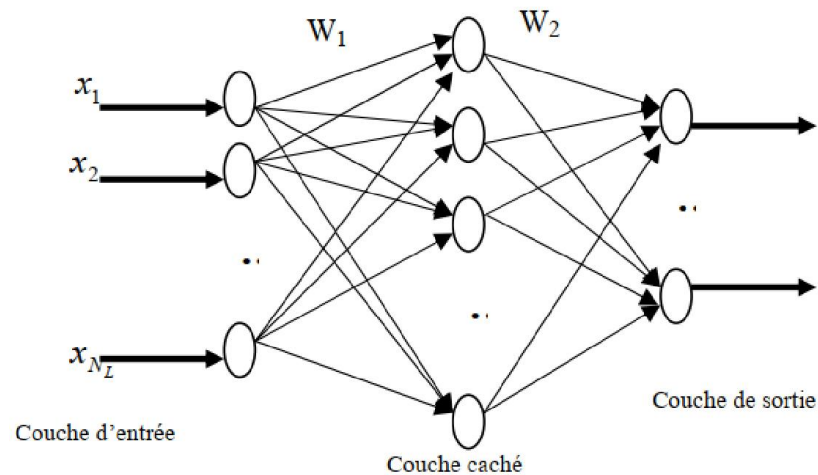


Fig. III.03 : Un réseau de neurone non bouclé

- **Les réseaux bouclés ou les réseaux récurrents (recurrent networks)** possèdent une structure similaire à celle des réseaux unidirectionnels mais complétée par des connexions entre éléments de la même couche ou vers des couches amont. Ces réseaux sont assez puissants car leur fonctionnement est séquentiel et adopte un comportement dynamique.

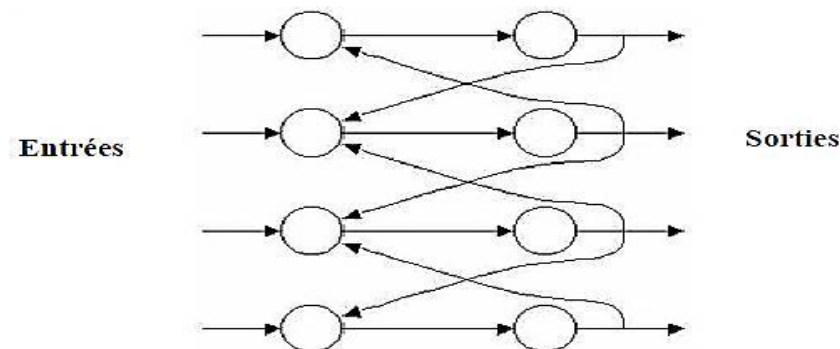


Fig. III.04 : Un RNA bouclé (a connexions récurrentes)

- Dans la catégorie des **réseaux à connexions complexes**se trouve tous les réseaux qui ne trouvent pas leur place dans les deux catégories précédemment citées. Nous pouvons mentionner les SOM (Self Organizing Map), LVQ (Learning Vector Quantization), ART (Adaptative Resonance Theorie), RCE (Restricted Coulomb Energy), les réseaux probabilistes.

### III.6 Apprentissage des réseaux de neurones

Lorsque la structure du réseau de neurones est fixée, il faut choisir un processus d'apprentissage, par lequel les poids vont être ajustés de manière à satisfaire un critère d'optimisation. Il est possible d'obtenir une solution satisfaisante seulement si la complexité du réseau de neurones est adaptée au problème à résoudre. L'apprentissage fait appel à des exemples de comportement du processus à modéliser.

- **L'apprentissage est supervisé** quand il est possible de fournir une sortie désirée. Les poids du réseau de neurones sont ajustés en fonction d'un signal d'erreur qui est la différence entre la sortie fournie par le réseau et la sortie désirée.
- **L'apprentissage est non-supervisé** lorsque l'adaptation des poids ne dépend que de critères internes au réseau. L'adaptation se fait uniquement avec les signaux d'entrées. Aucun signal d'erreur, aucune sortie désirée n'est prise en compte.
- **L'apprentissage est de type « par renforcement »** lorsque le réseau de neurones interagit avec l'environnement. L'environnement donne une récompense pour une réponse satisfaisante du réseau et assigne une pénalité dans le cas contraire. Le réseau doit ainsi découvrir les réponses qui lui donnent un maximum de récompenses.

### III.7 Avantages des techniques intelligentes

Les techniques de l'intelligence artificielle appliquées à la commande offrent plusieurs avantages :

- ✓ leur conception ne requiert pas de modèles mathématiques du processus à commander.
- ✓ elles améliorent les performances de la commande comparées à certaines techniques classiques.
- ✓ elles peuvent profiter de l'expertise humaine.



### III.8 Application des RNA pour la détection des défauts de l'onduleur [16][17]

Le modèle qu'on va élaborer, on va l'utiliser dans cette section pour le diagnostic de défaut de circuit ouvert en utilisant les RNA.

#### III.8.1 Construction des blocs RNA

La structure du RNA prend la forme suivante :

- Réseau à 3 couches: 1 seule couche cachée
- 10 neurones dans la couche cachée
- Le nombre de nœuds à l'entrée est égal à 9
- Le nombre de nœuds dans la couche de sortie est 9 sorties pour la détection de défaut. (Voir Fig. III.05)

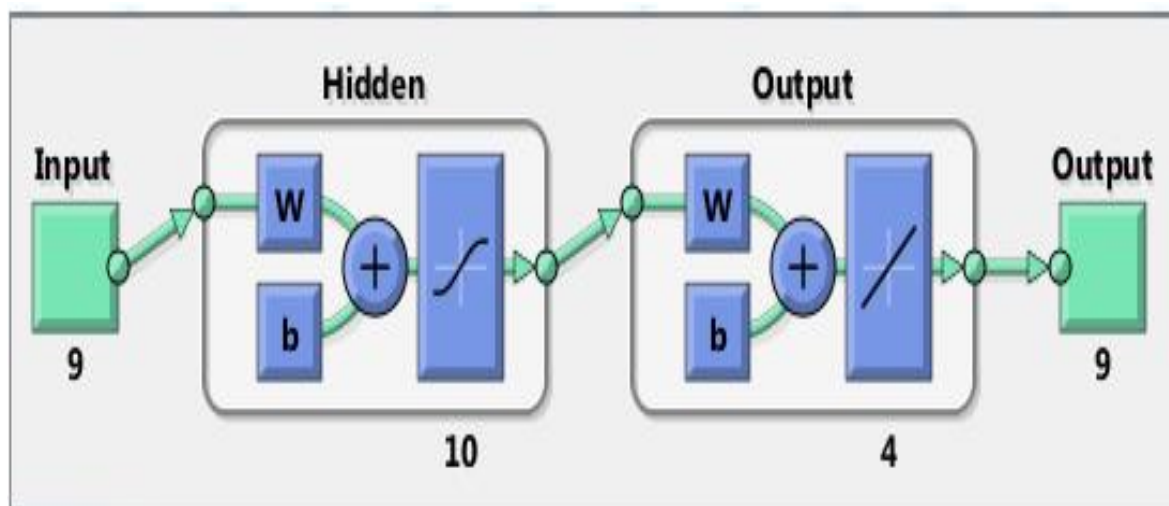


Fig. III.05 : Construction des blocs RNA

Les étapes de construction et de validation des réseaux de neurones sont réparties en trois phases:

#### a. Choix des entrées des réseaux

les entrées du RNA sont les valeurs moyennes des courants de phase ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ) et les déphasages entre les courants de phase : (BA, CA, AC, BC, AB, CB) ce qui signifie que le nombre d'entrées de ce réseau est égal à 9 (voir la Fig. III.06).

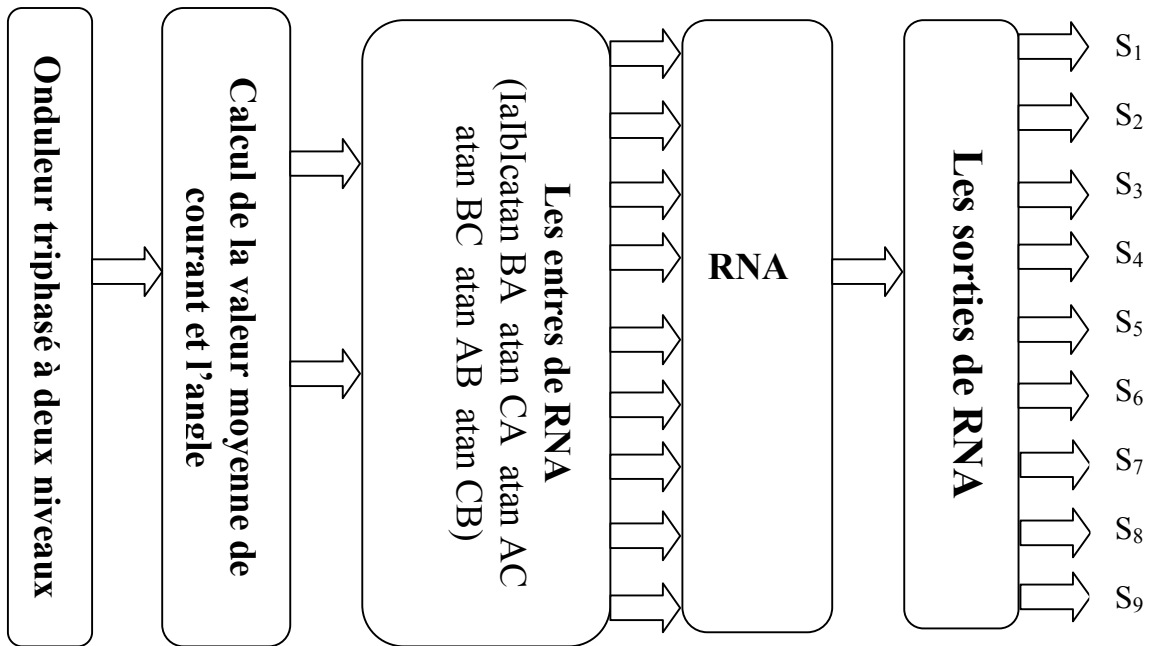


Fig. III.06: Structure du réseau de neurones utilisé

L'architecture de réseau de neurones étudié est donnée par la figure III.07:

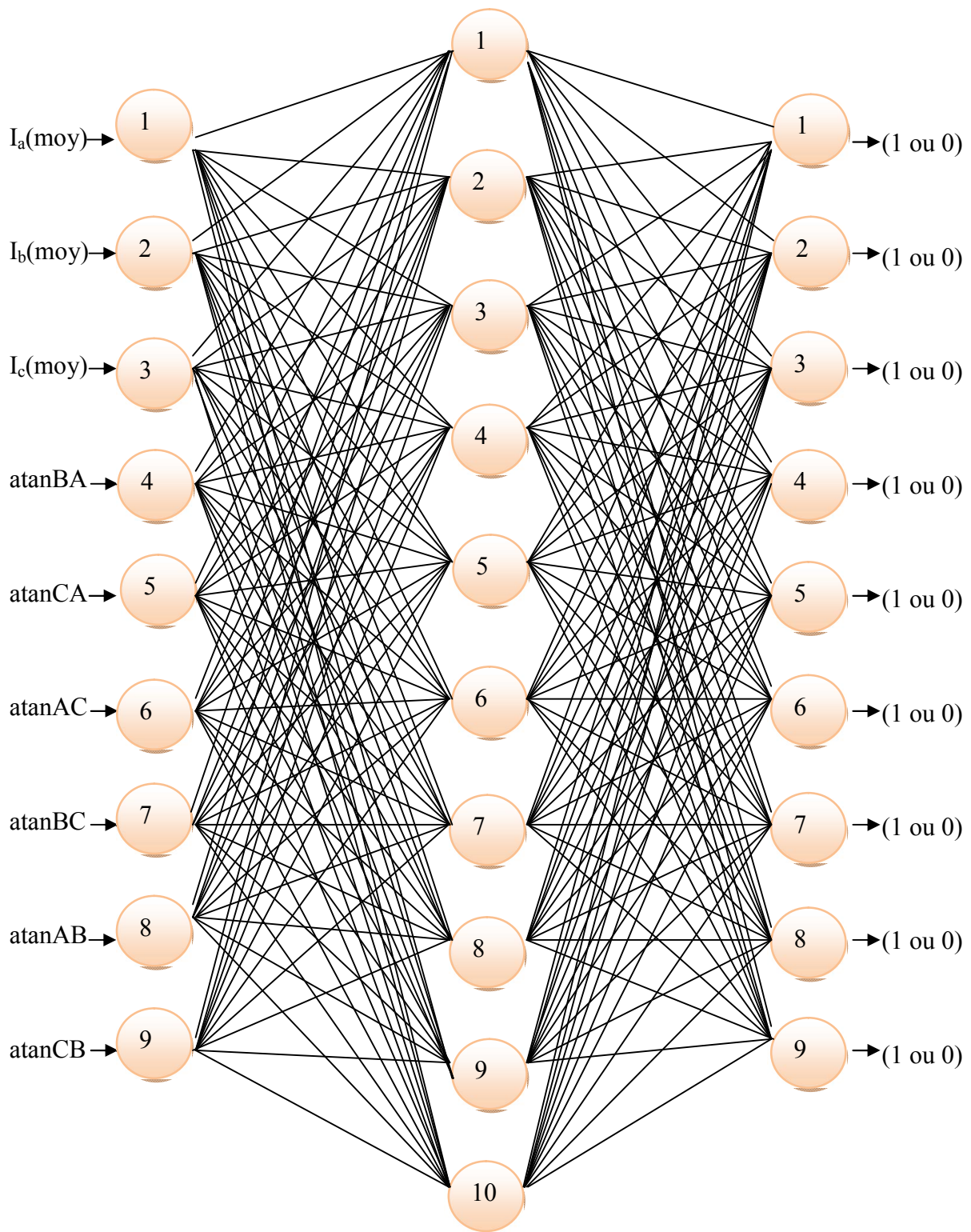


Fig.III.07 : Architecture de base de réseau de neurone artificiel

### b. Choix des sorties du réseau

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque à sa sortie qui correspond à un défaut du composant.

Dans notre travail on a :

- Le nombre de sorties de réseau est égal à 9
- Les différents défauts aux niveaux des composants constituant l'onduleur sont représentés sur le tableau (III .02), avec leurs codes associés.

Condition de défaut		Codification/Sortie désir
Normal		0 0 0 0 0 0 0 0 0
T1		1 0 0 0 0 0 0 0 0
T2		0 1 0 0 0 0 0 0 0
T3	1 1 0 0 0 0 0 0 0	
T4		0 0 1 0 0 0 0 0 0
T5		1 0 1 0 0 0 0 0 0
T6		0 1 1 0 0 0 0 0 0
T1&T2		1 1 1 0 0 0 0 0 0
T3&T4	0 0 0 1 0 0 0 0 0	
T1&T3	1 0 0 1 0 0 0 0 0	
T2&T3	0 1 0 1 0 0 0 0 0	
T3&T5	1 1 0 1 0 0 0 0 0	
T1&T6	0 0 1 1 0 0 0 0 0	
T2&T4	1 0 1 1 0 0 0 0 0	
T2&T6	0 1 1 1 0 0 0 0 0	
T1&T5	1 1 1 1 0 0 0 0 0	

Tableau III.02 : Classification des défauts avec leurs codifications

### c. Choix de fonction d'activation

Comme les sorties sont binaires et les entrées réelles, la fonction d'activation adoptée

est une fonction sigmoïde  $F(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ , présentée sur **Fig. III.08**

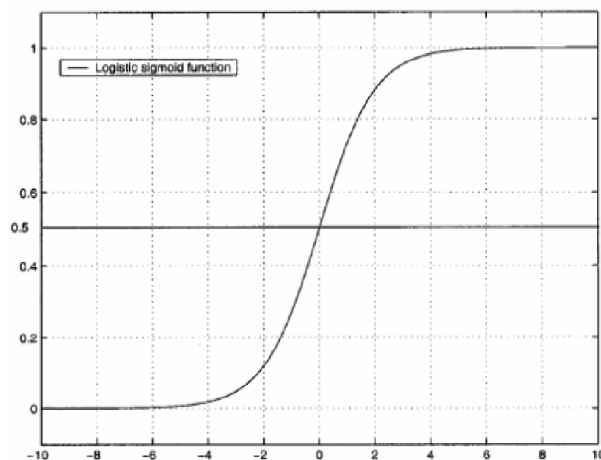


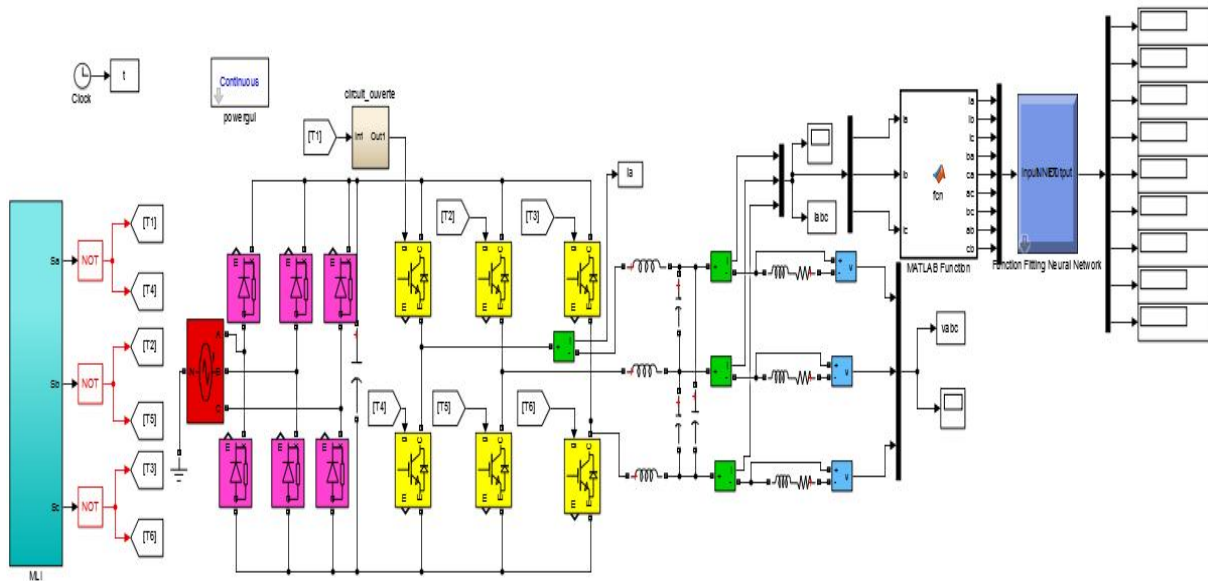
Fig. III.08 : Fonction sigmoïde

### III.9 Apprentissage de réseaux de neurones

#### III.9.1 Système de diagnostic par les réseaux de neurones

Le système surveille l'amplitude des courants ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), qui vont être les entrées du réseau de neurone, après un traitement de ces courants par le réseau de neurone ce dernier détecte et localise le défaut.

La structure de ce modèle est donnée par le modèle Matlab/Simulink ci-dessous (**Fig. III.09**) :



**Fig. III.09** :Système de simulation de diagnostic des défauts de l'onduleur par le réseau de neurone

#### III.9.2 Résultats et interprétations

Les meilleures performances d'apprentissage sont obtenus à travers un bon choix de la structure du réseau de neurones après plusieurs test d'apprentissage, le réseau obtenu est caractérisée par une architecture simple comportant une couche d'entrée, une couche de sortie pour la décision et une couche cachée composée de dix neurone dont la fonction de transfert est de type sigmoïde et de type linéaire pour le neurone de la couche de sortie.

Les performances d'apprentissage du réseau de neurones utilisées, sont évaluées à travers l'erreur quadratique moyenne (EQM). Pour notre cas le RNA atteint une valeur de  $4.1731e^{-15}$  **Fig. III.10**

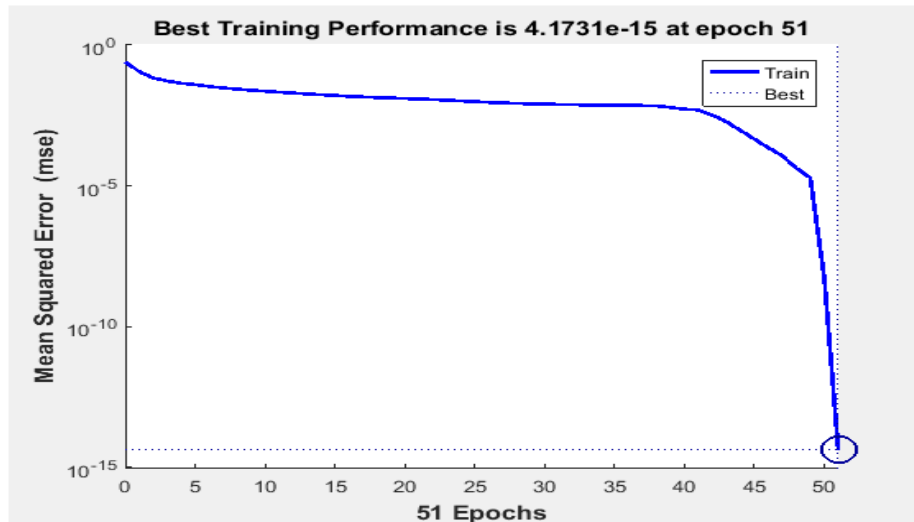


Fig. III.10 Performance de RNA

III.9.3 Tests de RN utilisé

Une fois que le RNA est construit et que son apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, on fait des tests pour plusieurs types de fonctionnement, leurs résultats sont présentés dans les figures ci-dessous Fig.III.11 et III.12.

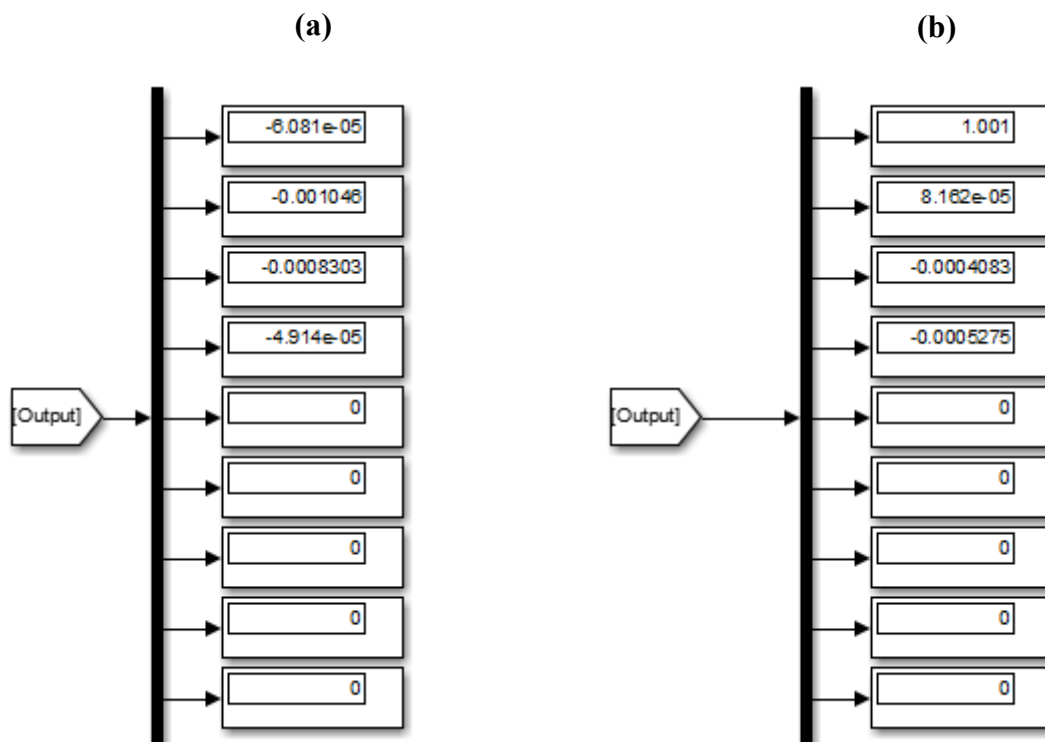
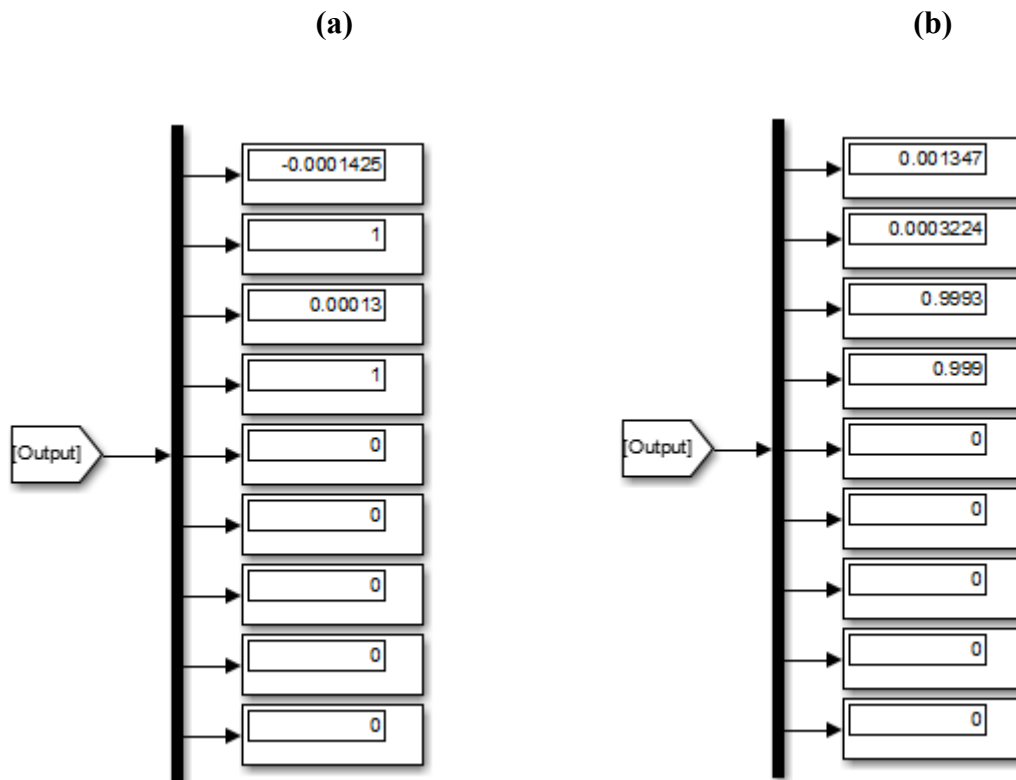


Fig.III.11 : Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas de fonctionnement : (a) normal et (b) défaut simple dans l'interrupteur T1



**Fig.III.12 :Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas de défaut double :(a) défaut T2&T3 et(b) défaut T1&T6**

Les résultats obtenus dans les figures III.11 et .12 montrent la réponse du système conçu pour la détection et localisation de défauts d'interrupteurs.

### III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, un système automatique de diagnostic et de localisation des défauts de l'onduleur est proposé, il est basé sur l'utilisation des outils avancés à base des réseaux de neurones. Les défauts qui peuvent être détectés sont les défauts simples (défaut dans un interrupteur) ou multiples (défaut dans 02 interrupteurs) de type circuit ouvert. Après une mise en œuvre et des tests réussis de la technique proposée, il est conclu que les résultats de détection et de diagnostic de panne proposés sont satisfaisants. En outre, l'algorithme d'extraction de caractéristiques proposé est simple, car il ne nécessite aucun calcul mathématique complexe par rapport aux techniques précédentes. La simplicité du système augmente le temps de réponse, raison pour laquelle le système proposé peut détecter les défauts avec une rapidité et une précision élevées. Ce système peut détecter et diagnostiquer des erreurs uniques ou multiples au cours d'un cycle de courant avec une précision.

L'étude présentée dans ce mémoire de fin d'études constitue une contribution exploratrice par apport au thème de diagnostic des défauts de l'onduleur en mettant l'accent sur la détection et de la localisation des défauts de circuit ouvert dans l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux par la technique des réseaux de neurones.

Dans le premier chapitre on a essayé de faire un état de l'art sur le convertisseur statique bien entendu l'onduleur, nous avons cité quelques rappels sur l'onduleur, ensuite, les défauts qui peuvent affecter son bon fonctionnement. A savoir les défauts de circuit ouvert et court-circuit d'un interrupteur (IGBT) d'un onduleur.

Ensuite on a cité les différentes techniques utilisées pour détecter ces différents défauts.

Dans le deuxième chapitre on a abordé la technique utilisée pour améliorer la qualité de la tension de sortie de l'onduleur, qui est la technique de modulation des largeurs d'impulsion MLI, En ce qui concerne la détection de défaut de circuit ouvert d'un interrupteur (IGBT) d'un onduleur avec une méthode de détection simple et rapide basée sur le contour de Park, les résultats de simulation ont été effectués pour le fonctionnement sain et avec défaut de circuit ouvert d'un interrupteur (IGBT) de l'onduleur, en utilisant l'environnement MATLAB (Simpower system)

Dans le troisième chapitre, nous avons proposé et appliqué une technique basée sur l'intelligence artificielle pour la détection et la localisation des défauts affectant l'onduleur qui est basé sur les réseaux de neurones artificiels qui a donné des résultats efficaces et performants (en termes de rapidité et de précision)

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire peuvent être améliorés à travers des études complémentaires sur plusieurs points:

- Étendre l'étude de l'existence de défauts de court-circuit et le vieillissement des composants des interrupteurs dans l'onduleur.
- Généraliser l'algorithme pour les divers défauts.
- Tester l'algorithme expérimentalement



- [1] **A.Boukaroura**, « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'Approche Bond-Graph », mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2009.
- [2] **I.Taibi et I.Djedid**, « Détection et localisation des défauts dans les onduleurs à MLI par logique Floue », mémoire de master , Université Ibn Khaldoun Tiaret,2018
- [3] **A.Mokaddem et ch.Messabih**, « Etude et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux et trois niveaux à structure NPC », mémoire de licence, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2017.
- [4] **Z.Betta et N. Chref**, « Diagnostic de défaut dans les convertisseurs statique » mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret ,2016.
- [5] **F.benouis et M.benzioua**,« Les défauts des machines électriques et leur diagnostic » mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret ,2018.
- [6] **N.Aouane et S.CHAMKHA**, « Détection, localisation et reconfiguration de défauts onduleur à deux niveaux appliqué dans la commande de la machine asynchrone à cage », mémoire de Msater, Université M'hamed Bougara-Boumerdas 2017 .
- [7] **B.Lakehal**, « Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux » mémoire de Master, Université A/Mira- Bejaia, 2015
- [8] **P.Stoica et R.L.Moses**, « Introduction to Spectral Analysis, Vol.1. Prentice Hall Upper saddle River, 1997.
- [9] **Y. Hadjiyasser Gadi**, « Détection de defaults dans le convertisseur à MLI d'une machine asynchrone », Mémoire de master, Kasdi Merbah Ouargla,2014.
- [10] **M.h benabdelgani**, «Etude, conception et réalisation d'un convertisseur statique hybride multi niveaux tolérant aux défauts», thèse de doctorat, Université de Toulouse,2016 .
- [11] **Y.Latrache**,« Diagnostic des lignes de transmission par la méthode des réseaux de neurone artificielle», mémoire de master, université de Constantine I, 2014
- [12] **M. Boudjedaimi**, « Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels», mémoire de Magister, Mouloud Mammeri, Tizi Ouzo, 2009
- [13] **Y.Bendaoud**,« Prédiction des résistances mécaniques des bétons à base des ciments composés en utilisant les réseaux neurones artificiels », mémoire de master université de Constantine I ,2014.
- [14] **A.Zahir**, « Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de neurones », mémoire de master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia ,2017
- [15] **A. Kaazzaoui**, « Amélioration des performances d'un filtre active parallèle application des réseaux adaptatifs de neurones » mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi de Oum el Bouaghi, 09 juin 2015.

- [16] **A. Furqan, T.Muhammade, and H.Sung**, «Neural network fault detection and diagnostic system for three phase invariable speed drive with induction Motor», Journal of Control Science and Engineering, Volume 2016 <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1286318>
- [17] **M. Talha1, F. Asghar1, and S.Kim**, «A matlab and simulink based three-phase inverter fault diagnosis method using three-dimensional features» Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 16, No. 3,September 2016, pp. 173-180, <http://dx.doi.org/10.5391/IJFIS.2016.16.3.173>

## Résumé

Le progrès de l'électronique de puissance est basé essentiellement sur les convertisseurs statiques, dans les différents domaines, ne cesse d'augmenter. Parallèlement, il y avait énormément d'efforts scientifiques et techniques déployés pour la mise en place de techniques permettant la surveillance et le diagnostic des défauts pour éviter tous dysfonctionnement des systèmes électriques.

Ce travail présente donc des méthodes de détection et localisation de défauts d'ouverture des interrupteurs (IGBT) d'un onduleur à MLI

Principalement, deux méthodes sont considérées à savoir : Les méthodes concernent l'analyse de la trajectoire du contour de Park et la méthode de l'intelligence artificielle basé sur les réseaux de neurone, dans le but d'analyser les résultats simulés dans l'environnement **MATLAB (Sim power system)**.

**Mots Clés :** Diagnostic, Onduleur à MLI, Défaut de circuit ouvert, Réseau de neurone, Contour de Park

## ملخص

تطور إلكترونيك الاستطاعة مرتكز أساسا على المبادلات الساكنة في مختلف المجالات, بالموازاة مع ذلك مجهودات علمية وتقنية واسعة من أجل وضع تقنيات تسمح بمراقبة و تشخيص الاعطال لمنع أي خلل وظيفي على المستوى الأنظمة الكهربائية.

إن هذا العمل يمثل آليات الكشف عن مواقع العطل في الدائرة المفتوحة على مستوى قواطع المومج الثلاثي المتحكم فيها عن طريق استخدام استراتيجية **MLI**

وفي الأساس توجد آليتان من الواجب معرفتهما: تتعلق الطرق بطريقة بارك وطريقة الذكاء الاصطناعي القائم على الشبكات العصبية, بهدف تحليل نتائج المحاكاة في البرنامج **MATLAB**. الكلمات المفتاحية: تشخيص, مومج **MLI**, عطل دائرة مفتوحة, الشبكات العصبية, كشف تحديد الموقع

## Abstract

The progress of power electronics based mainly on static converters, continues to grow. At the same time, there was a great deal of scientific and technical effort to develop techniques to monitor and diagnose faults to prevent malfunction of electrical systems. This work therefore presents methods for detecting and locating switch opening faults (IGBT) from a UPS to MLI

Mainly, two methods are considered: the methods concern the analysis of the Park's contour trajectory and the artificial intelligence method based on neural networks in order to analyze simulated results in the environment **MATLAB (Sim Power System)**.

**Keywords:** Diagnostic, Inverter at MLI, Open circuit fault, neural network, Outline of Park.