

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication  
Département d'Electronique et des Communications**



**Mémoire**

**MASTERACADEMIQUE**

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Génie Électrique

**Spécialité:** Machines électriques et  
Électronique de puissance

**Présenté par:** SADKI Nour elhouda

**Thème**

***SIMULATION DES DÉFAUTS  
STATORIQUE D'UN MOTEUR A  
ASYNCHRONE***

**Soutenu publiquement**

**le:08/06/2015**

**Devant le jury :**

<b>Mm .Bouali khadija</b>	<b>M.C.B</b>	<b>Président</b>	<b>UKM Ouargla</b>
<b>Mr. Taibidjamel</b>	<b>M.A.A</b>	<b>Encadreur</b>	<b>UKM Ouargla</b>
<b>Mr. Sahraouilasehar</b>	<b>M.C.B</b>	<b>Examineur</b>	<b>UKM Ouargla</b>

**Année Universitaire 2014-2015**

## *Remerciement*

*Mon premier remerciement va à Allah soubhanou wa tahala.*

*Je tenais à remercier vivement mon encadreur, Mr le professeur "Taïbi djamel", pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail.*

*Je souhaiterais également remercier mes professeurs de la faculté des sciences appliquées*

*Et toutes les équipes de la faculté de hydrocarbure et spécialement le doyen*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au de la réalisation de ce mémoire.*

*Pour toute merci*

## SYMBOL ET NOTATIONS

<b>Symbole : notation</b>
<b>MAS : Machines Asynchrones</b>
<b>IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.</b>
<b>MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.</b>
<b>d-q : Axes longitudinal et transversal (transformation de Park).</b>
<b>Ld : Inductance suivant l'axe d.</b>
<b>Lq : Inductance suivant l'axe q.</b>
<b>Id : Le courant statorique de l'axe d.</b>
<b>Iq : Le courant statorique de l'axe q.</b>
<b>Id : Le courant statorique de l'axe d.</b>
<b>Vd : La tension statoriques de l'axe d. lds</b>
<b><math>\Phi_{sf}</math>: Flux permanent.</b>
<b>a, b, c : Correspondent aux trois phases de stator.</b>
<b><math>\Omega</math>: Vitesse mécanique.</b>
<b>f : Coefficient de frottement visqueux.</b>
<b>p : Nombre de paires de pôles.</b>
<b>J : Moment d'inertie du rotor.</b>
<b>Cr : Couple de charge.</b>
<b><math>i_{d_{ref}}</math> : Le courant référence statorique.</b>
<b><math>\Omega_{ref}</math> : Référence de vitesse.</b>
<b>[Rs] : Matrice des résistances statoriques.</b>
<b><math>V_a^*, V_b^*, V_c^*</math> : Références de tensions.</b>
<b><math>e_d, e_q</math> : Chute de tension avec l'axe d et q .</b>
<b>D1, D2 , D3 : Les diodes à cathode .</b>
<b>D1', D2' , D3' : Les diodes à anode .</b>
<b>V red : La tension redressée.</b>
<b><math>e_d, e_q</math> : Chute de tension avec l'axe d et q .</b>
<b><math>V_a, V_b, V_c</math> : Tensions de phases statoriques</b>
<b><math>I_a, I_b, I_c</math> : Courants de phases statoriques.</b>

<b>Sabc : L'interrupteur du bras a, b ou c d'onduleur (deux niveaux).</b>
<b>0 : Point milieu fictif à l'entrée continu.</b>
<b>n : Le neutre de la machine.</b>
<b>Va0,Vb0, Vc0 : Tensions d'entrée de l'onduleur (deux niveaux).</b>
<b>Van,Vbn, Vcn : Tensions de phase de l'onduleur (deux niveaux).</b>
<b>Vn0 : La tension fictive entre le neutre de la MSAP et le point fictif d'indice « 0 ».</b>
<b>Va, Vb, Vc : Tensions de phases statoriques</b>
<b>Ia, Ib, Ic : Courants de phases statoriques.</b>
<b>Sabc : L'interrupteur du bras a, b ou c d'onduleur (deux niveaux).</b>
<b>0 : Point milieu fictif à l'entrée continu.</b>
<b>[Lss]: Matrice d'inductance statorique.</b>
<b>[Φsf]Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.</b>
<b>[T]: La matrice de transformation de Park .</b>
<b>[A]: Matrice fondamentale qui caractérise le système.</b>
<b>[B]: Matrice d'entrée.</b>
<b>[U]: Vecteur de commande.</b>
<b>[X]: Vecteur d'état.</b>
<b>Ns : Le nombre de spires par phase.</b>
<b>Nf : Le nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut.</b>
<b>NEMA (National Equipment Manufacturer's Association).</b>

## **LISTE DE FIGURE**

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<b>CHAPITRE I</b>		
I-1	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	02
I-2	Représentation des différents défauts statoriques possibles	02
I-3	Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone	02
I-4	Différents défauts statoriques.	05
I-5	rupture de barre	06
I-6	représentation de l'excentricité statique et dynamique	07
I-7	Représentation spatiale de la transformation triphasée/biphasée.	14
I-8	représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.	15
I-9	Schéma de simulation sous Simulink	20
I-10	Résultats de simulation d'un démarrage à vide suivi d'application d'une charge de 30 Nm à $t=0.5$ s	21
<b>CHAPITRE II</b>		
II-1	Schéma d'un onduleur de tension triphasé avec sa charge	25
II.2	Schéma de principe de la technique MLI.	26
II.3	Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI	26
II.4	court-circuit sur un interrupteur d'un des bras	27
II.5	Circuit ouvert sur un interrupteur d'un des bras	27
II.6	Modèle de simulation de MAS associé un onduleur à MLI	29
II.7	Courant statorique de MAS avec onduleur sans défaut	29
II.8	vitesse de MAS avec onduleur sans défaut	30
II.9	couple de MAS avec onduleur sans défaut	30
II.10	Simulateur de défauts d'onduleur de tension	31
II.11	Court-circuit sur un interrupteur (interrupteur haut G1)	31
II. 12	couple de MAS Court-circuit sur un interrupteur (interrupteur haut G1)	31
II. 13	vitesse de MAS Court-circuit sur un interrupteur (interrupteur haut G1)	32
II.14	Court-circuit sur deux interrupteurs (deux même bras, G1 et G2)	32

<b>II.15 : couple de MAS Court-circuit sur deux interrupteurs (deux même bras, G1et G2)</b>	32
<b>II.16 : vitesse de MAS Court-circuit sur deux interrupteurs (deux même bras, G1et G2)</b>	32
<b>II.17 : Circuit ouvert d'un interrupteur (interrupteur haut G1)</b>	33
<b>II.18 : couple de MAS Circuit ouvert d'un interrupteur (interrupteur haut G1)</b>	33
<b>II.19 : vitesse de MAS Circuit ouvert d'un interrupteur (interrupteur haut G1)</b>	33
<b>II.20 : Circuit de deux interrupteurs (deux même bras, G1 et G2)</b>	32
<b>II.21 : vitesse de MAS Circuit de deux interrupteurs (deux même bras, G1 et G2)</b>	32
<b>II.22 : couple de MAS Circuit de deux interrupteurs (deux même bras, G1 et G2)</b>	32
<b>II.23 Représentation bidimensionnelle des courants statoriques lors d'un défaut de circuit ouvert</b>	36
<b>II.24 Représentation bidimensionnelle des courants statoriques lors d'un défaut de court-circuit</b>	37
<b>II.25 : (a) : Courant de cour circuit sur un interrupteur défaut dans la branche (a) : Le spectre harmonique</b>	38
<b>II.26 : (a) : Courant de défaut cour circuit sur deux interrupteurs dans la branche (a) : Le spectre harmonique</b>	39
<b>II.27 : (a) : Courant de défaut circuit ouvert sur un interrupteur dans la branche (a) : Le spectre harmonique</b>	39
<b>II.28 : (a) : Courant de défaut circuit ouvert sur deux interrupteurs dans la branche (a) : Le spectre harmonique</b>	40
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>III.1 : Modèle de simulation de déséquilibre d'alimentation</b>	44
<b>III.2 : Résultats de simulation durant un déséquilibre d'alimentation dans la phase Isa</b>	45
<b>III.3 : Inversement de sens de rotation du moteur asynchrone</b>	46
<b>III.4 : Modèle de simulation d'inversement de deux phases d'alimentation asynchrone</b>	47
<b>III.5 : Résultats de simulation durant une inversion de deux phases L1 et L2 à t=0.5 s</b>	47

<b>III.6 : Résultats de simulation au cours de différente surcharge du moteur</b>	49
<b>III.7 : Modèle de simulation de coupure d'une phase d'alimentation</b>	50
<b>III.8 : Résultats de simulation durant le défaut de coupure de la phase A à t=0.2s</b>	51
<b>III.9 : Modèle de simulation de défaut de court-circuit phaseà la terre</b>	52
<b>III.10 : Résultats de simulation durant le court-circuit de la phaseA à la terre à t=0.2s</b>	53
<b>III.11 : Résultats de simulation durant le défaut sous/surtension</b>	55
<b>III-12 : Modèle de simulation de système de détectionet de protection</b>	56

## *Sommaire*

### **SOMMAIRE**

### **NOTATIONS**

### **INTRODUCTION GENERALE** 01

### *Chapitre I : Moteur asynchrone et méthodes de diagnostic*

I.1) Introduction	02
I.2) Constitution de la machine asynchrone à cage	02
I.3) Défaillances de la machine asynchrone :	02
I.3.1) Défauts d'ordre électrique	02
I.3.1.1) Défauts statoriques	03
I.3.1.2) Court-circuit entre spires	04
I.3.1.3) Court-circuit entre phases	04
I.4) Défaillances au rotor	05
I.4.1) Ruptures de barres	05
I.4.2) Ruptures d'anneaux	06
I.4.3) Excentricité statique et dynamique	06
I.5) Causes des défaillances	07
I.5.1) Cause des défauts statorique	07
I.5.2) Causes des défauts rotoriques	08
I.6) Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	08
I.7) Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone	08
I.7.1) Méthodes sans modèle	08
I.7.2) Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	09
I.7.3) Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	09
I.7.4) Diagnostic par analyse du courant statorique	09
I.7.5) Diagnostic par analyse du vecteur de Park	09
I.7.6) Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle	09
I.8) Modélisation et Simulation du moteur asynchrone	10
I.8.1) Hypothèses simplificatrices	10
I.9) Equations de la machine	11
I.9.1) Equations électriques	11



I.9.2) Équations magnétiques	11
I.9.3) Equations mécaniques	12
I.10) Transformation de Park	13
I.11) Application aux équations de la machine	15
I.11.1)Equations des tensions	15
I.11.2) Equations des flux	16
I.11.3) Équations mécaniques	16
I.12)Choix du référentiel	17
I.12.1) Référentiel lié au stator	17
I.12.2) Référentiel lié au rotor	17
I.12.1)Référentiel lié au champ tournant	18
I-13)Représentation d'état du modèle de la machine asynchrone	18
I.14)Simulation numérique	19
I.15) Interprétation des résultats de simulation	21
I.16)Conclusion	22

## ***Chapitre II: Détection de Défauts dans l'association Convertisseur -MAS***

II.1)Introduction	24
II.2)Onduleur de tension triphasé	24
II.2.1)Commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)	25
II.3)Diffèrent type de défaut d'onduleur	27
II.3.1)Court-circuit sur un interrupteur	27
II.3.2)Circuit ouvert sur un interrupteur	27
II.3.3)Court-circuit de deux interrupteurs	28
II.3.4)Circuit ouvert de deux interrupteurs	28
II.4)Simulation du moteur asynchrone en absence de défaut (sain)	29
II.4.1)Résultats de simulation	29
II.5)Simulation du moteur asynchrone en présence de défauts d'onduleur	30
II.5.1)Résultats de simulations	31
II.5.1.1)Défauts de court-circuit	31
II.5.1.2)Défauts de circuit ouvert	33
II.5.2)Interprétation des résultats	34
II.6) Diagnostic des défauts par analyse des courants statoriques dans	

le repère de Concordia	35
II.7)Détection des défauts par traitement du signal	37
II.7.1)Résultats de simulation de détection des défauts par traitement de signal	38
II.7.2)Interprétation des résultats	40
II.8)Conclusion	41

### ***Chapitre III: Simulation de défauts statoriques du moteur asynchrone***

III.1)Introduction	43
III.2)Moteur asynchrone en présence de défauts de déséquilibre d'alimentation	43
III.2.1) Déséquilibre du système d'alimentation	43
III.2.2)Déséquilibre du système d'alimentation	44
III.2.3)Simulation de défaut de déséquilibre d'alimentation	44
III.2.4) Résultats de simulation	44
III.3) Moteur asynchrone en présence de défaut d'inversion de deux phase d'alimentation	46
III.3.1)Nécessité du contrôle de l'ordre des phases	46
III.4) Moteur asynchrone en présence de surintensité (surcharge)	48
III.4.1) Causes	48
III.5) Défaut de coupure d'une phase d'alimentation	50
III.6)Défaut de court-circuit monophasé à la terre	52
III.7)Défaut de sous/surtension d'alimentation	54
III.8)Système de détection et de protection	56
III-9) Conclusion	57
<b>Conclusion générale</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>61</b>
<b>ANNEX A</b>	<b>63</b>

# **Introduction générale**

# Introduction générale

La machine asynchrone, de part sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts.

Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale.

Le travail réalisé dans ce mémoire présente la détection des défauts statorique dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT) et de vecteur bidimensionnelle de Park. Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre, est consacré sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés ainsi que la modélisation et la simulation du modèle de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park

Le second chapitre est réservé en premier lieu, à l'étude de la machine alimentée par un onduleur de tension en cas de défaut de l'un de composante de convertisseur. En second lieu ; la détection des deux défauts de court circuit et du circuit-ouvert en utilisant les méthodes de traitement de signal du courant statorique à base de l'FFT et de l'étude bidimensionnelle de vecteur de Park.

En troisième chapitre, une simulation de différents défauts statorique, comme le déséquilibre de tension, sous/surtension, sur charge, coupure d'une phase, inversion de deux phases et le court-circuit phase à la terre est présentée.

Enfin une conclusion générale ainsi les perspectives futures pour l'amélioration de ce travail sont présentées.

# **CHAPITRE I**

## **Moteur asynchrone et méthodes de diagnostic**

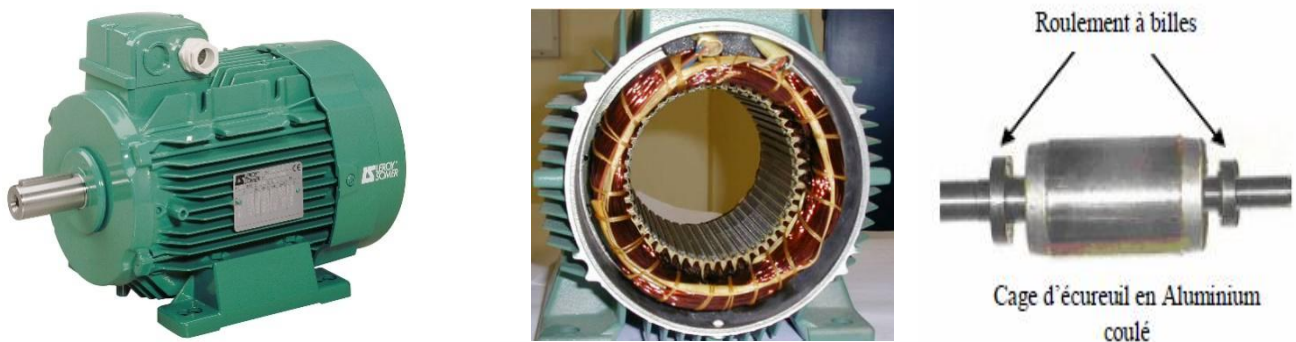
## I.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on essaye de décrire le comportement de la machine asynchrone à cage d'écureuil. La première partie fait un rappelsur la constitution de moteur asynchrone à cage d'écureuil. La seconde partie traite les différentes défaillancesqui peuvent affecter le moteur asynchrone. Nous évoquerons, essentiellement, les défauts statoriques, lesdéfauts rotoriques et les défauts mécaniques. La troisième partie est consacrée à l'analyse de deuxméthodes de diagnostic. La modélisation et simulation du moteur asynchrone a été exposée et analysée.[1]

## I.2 Constitution de la machine asynchrone à cage :

La machine asynchrone souvent appelée machine à induction, comporte deux partiesessentiellles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches etrelié à la source d'alimentation et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à caged'écureuil. Ces deux parties sont séparées par un entrefer. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage d'écureuil.[1]

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Fig I-1



Machine asynchrone

Stator

Rotor

**FigI-1:** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

## I-3 Défaillances de la machine asynchrone :

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. La détection de ces défauts en cours d'évolution et en cours d'apparition est l'un des objectifs des chercheurs.

### I-3-1 Défauts d'ordre électrique :

Les défaillances d'origine électrique peuvent dans certain cas être la cause d'un arrêt de la machine, ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes, on peut citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celle qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

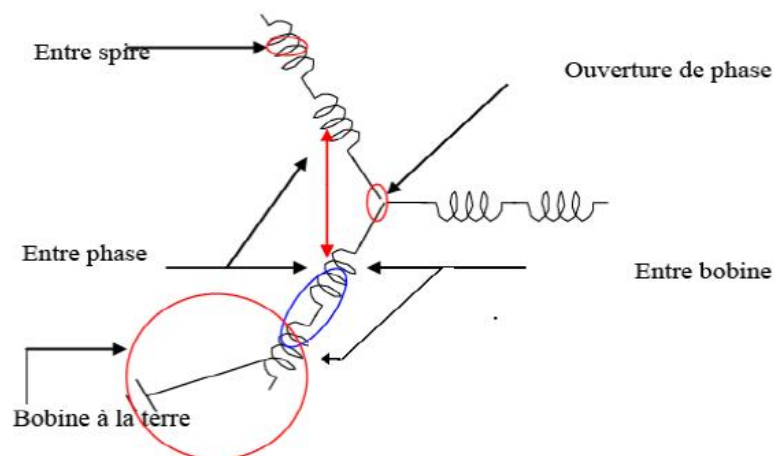
**I-3-1-1 Défauts statoriques :**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spices qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est :

$$f_{cc} = f_s \left[ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \tag{I-1}$$

avec n=1, 2,3 et k=1, 3,5

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la Fig (I-2).



**Fig I.2:** Représentation des différents défauts statoriques possibles





**Fig I-3** Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone**I-3-1-2 Court-circuit entre spires :**

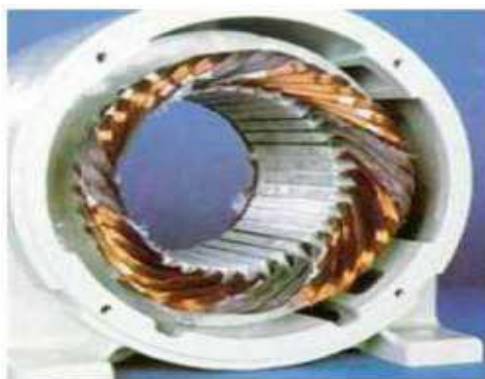
Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, et une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotoriques. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut de 2<sup>ème</sup> court-circuit. Par contre, le couple électromagnétique délivré par la machine reste sensiblement présente une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

**I-3-1-3 Court-circuit entre phases :**

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs

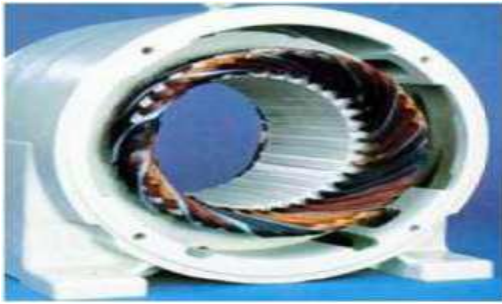
Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.[4]



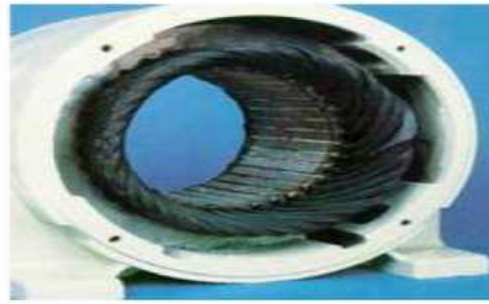
Ouverture d'une phase



Court-circuit dans une phase



Déséquilibre de l'alimentation



Damage dû à la surcharge



Masse dans l'encoche Dégradation causée par une surtension

**Figure I.4 Différents défauts statoriques.****I-4 Défaillances au rotor :**

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- ✓ thermique (surcharge,...)
- ✓ électromagnétique
- ✓ résiduel (déformation,...)
- ✓ dynamique (arbre de transmission,...)
- ✓ mécanique (roulement,...)
- ✓ environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- ✓ Rupture de barres
- ✓ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- ✓ Excentricité statique et dynamique

**I-4-1 Ruptures de barres :**

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la

vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées



**Fig I-5 Rupture de barre**

#### **I-4-2 Ruptures d'anneaux :**

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement confondu, avec la rupture de barres. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.[15]

#### **I-4-3 Excentricité statique et dynamique :**

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un

défaultroulement (usure), a un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité mixte, associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit, une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

**Fig I.6** Représentation de l'excentricité statique et dynamique

### I-5 Causes des défaillances :

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes : les initiateurs de défauts, les amplificateurs de défauts et les défauts de fabrication. La majorité de tous les défauts du rotor et du stator sont provoqués par une combinaison des divers efforts qui agissent sur ces deux composants de la machine.

#### I-5-1 Cause des défauts statorique :

Les défauts statoriques peuvent être dus à plusieurs raisons parmi lesquelles :

- un grand noyau du stator ou la température d'enroulements est élevée,
- attachement lâche à la fin de l'enroulement,
- contamination due à l'huile.

- cycle de démarrage fréquent,
- surtension, décharges électriques les fuites dans les systèmes de refroidissement.

### **I-5-2 Causes des défauts rotoriques :**

Comme pour le stator les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion d'anneau de court circuit sont nombreuses: [2]

- effort thermique due à l'échauffement de l'anneau du court-circuit et la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau),
- effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, l'excentricité de l'entrefer), bruits et vibration électromagnétiques,
- effort dynamique du au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi que les efforts cycliques,
- effort environnementale causées par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques.

### **I.6 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone :**

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.

- la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie .

### **I.7 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone :**

#### **I-7-1 Méthodes sans modèle :**

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en

œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations, ...etc.

#### **I-7-2 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites :**

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées .

#### **I-7-3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :**

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique .

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [3].

#### **I-7-4 Diagnostic par analyse du courant statorique :**

Parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) .

**I-7-5 Diagnostic par analyse du vecteur de Park :**

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ , qui sont calculées à partir des troiscourants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous :  $i_q = f(i_d)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut .

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement .

**I-7-6 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle**

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ✓ logique floue,
- ✓ réseaux neuronaux,
- ✓ reconnaissance des formes.

**I-8 Modélisation et Simulation du moteur asynchrone :**

La modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est une phase indispensable et nécessaire pour les différentes applications de commande, et également pour le diagnostic et la surveillance, le modèle mathématique permet d'observer et analyser des différentes évolutions de ses grandeurs électriques et électromagnétiques.

Cette partie traitera la modélisation de la machine asynchrone, basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement appelés d, pour direct, et q, pour quadrature [2] [3].

**I-8-1 Hypothèses simplificatrices :**

Afin de modéliser la machine asynchrone, un certain nombre d'hypothèses doit être pris en considération à savoir :

-La saturation dans le circuit magnétique est négligée, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.



-Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté afin de négliger les courants de foucault.

-Les pertes par hystérésis et l'effet de peau sont négligées.

-L'épaisseur de l'entrefer est considérée constante sur toute la périphérie de la machine, en négligeant en plus l'effet des encoches.

-La force magnétomotrice, créée par chacune des phases, est à répartition sinusoïdale, ce qui revient à ne considérer que la composante fondamentale. Ceci signifie que le flux d'enroulement à travers chaque phase et l'inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et statorique suivent une loi sinusoïdale en fonction de l'angle rotorique.[17]

-De plus, la machine est considérée comme un système symétrique et équilibré.

### I-9 Equations de la machine :

En tenant compte des Hypothèses simplificatrices et en adoptant la convention de signe moteur, les expressions générales de la machine en fonction des flux et des courants sont :

#### I-9-1-Equations électriques :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] & \text{au stator} \\ 0 = R_r [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{ABC}] & \text{au rotor} \end{cases} \quad (I-1)$$

Où :

$[V_{abc}] = (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc})^t$  et  $[V_{ABC}] = (0,0,0)^t$  : vecteurs tensions des trois phases statoriques et rotoriques respectivement.

$[i_{abc}] = (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})^t$  et  $[i_{ABC}] = (i_{rA}, i_{rB}, i_{rC})^t$  : vecteurs courants traversant les enroulements statoriques et rotoriques.

$[\Phi_{abc}] = (\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc})^t$  et  $[\Phi_{ABC}] = (\Phi_{rA}, \Phi_{rB}, \Phi_{rC})^t$  : vecteurs flux total statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ et}$$

Matrice résistance statorique

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Matrice résistance rotorique



**I-9-2-Équations magnétiques :**

Les équations magnétiques qui établissent la relation entre les flux et les courants statoriques et rotoriques s'écrivent:

$$\begin{cases} [\Phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \\ [\Phi_{ABC}] = [L_{sr}][i_{abc}] + [L_r][i_{ABC}] \end{cases} \quad (I-2)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Matrice inductance propre statorique      Matrice inductance propre rotorique

et :

$$[L_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_m & \cos(\theta_m - 4\pi/3) & \cos(\theta_m - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_m - 2\pi/3) & \cos \theta_m & \cos(\theta_m - 4\pi/3) \\ \cos(\theta_m - 4\pi/3) & \cos(\theta_m - 2\pi/3) & \cos \theta_m \end{bmatrix} \quad (I-3)$$

3)

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^t$$

$\theta_m$  : Angle entre la phase « as » du stator et la phase « ar » du rotor avec  $\omega = d\theta_m / dt$ .

$L_s, L_r$ : Inductance propre respective d'une phase statorique et rotorique.

$M_s, M_r$  : Inductance mutuelle respective entre deux phases statoriques et rotoriques.

$L_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.

Sous une forme développée, les expressions deviennent :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{sr}] [i_{ABC}] \} \\ 0 = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rs}] [i_{abc}] \} \end{cases} \quad (I-4)$$

D'après ses équations, il apparait clairement que le système est à coefficients variables dépendant de  $\theta_m$ ; ce qui rend la résolution plus difficile.

**I-9-3-Equations mécaniques :**

L'équation du couple s'exprime comme :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i]^t \left\{ \frac{d}{dt} [L] [i] \right\} \quad (\text{I-5})$$

Avec :

$$[i]^t = [i_a, i_b, i_c, i_A, i_B, i_C] \quad \text{et} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix}$$

Sachant que les matrices  $L_s$  et  $L_r$  contiennent des termes constants, alors l'expression du couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_{abc}]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L_{sr}] [i_{ABC}] \right\} \quad (\text{I-6})$$

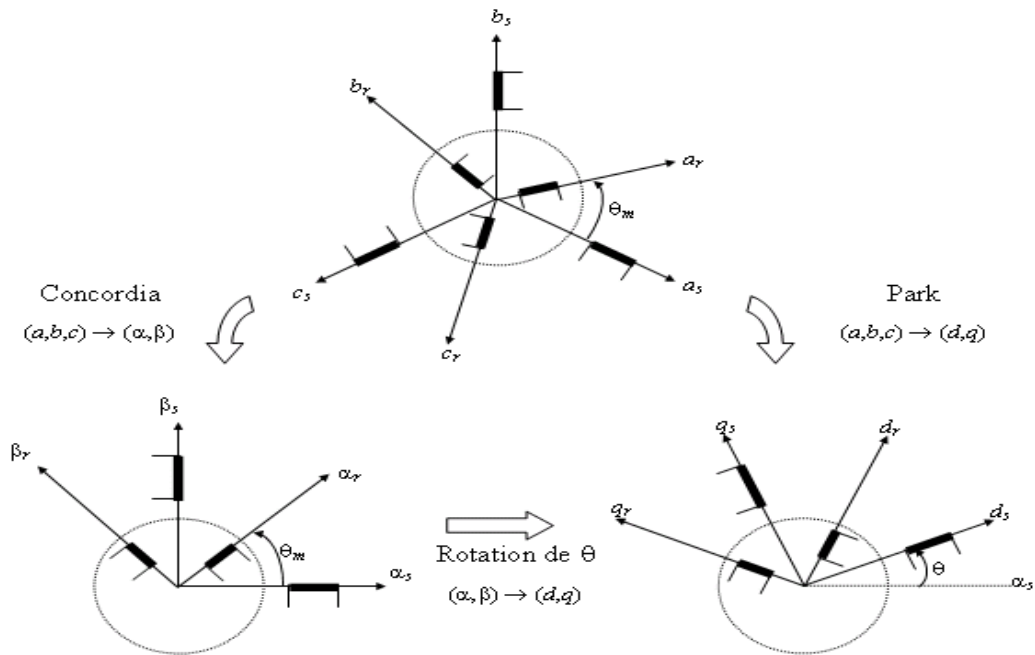
On aboutit ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, ce qui a pour conséquence une certaine complexité dans la résolution analytique. Afin de surmonter cette difficulté, nous adoptons la transformation triphasée– biphasée dite de « Park » .

**I-10 Transformation de Park :**

La transformation de Park figure (I-2) est très ancienne (1929) ; si elle devient à l'ordre du jour c'est grâce au progrès de la technologie des composants permettant maintenant de la réaliser a temps réel.

Cette transformation est constitué d'une transformation triphasé-diphase suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère « abc » vers le repère «  $\alpha\beta$  » puis vers le repère « dq ». Le repère «  $\alpha\beta$  » est toujours fixe par rapport au repère abc, par contre le repère « dq » est mobile. Il forme avec le repère «  $\alpha\beta$  » un angle qui est appelé l'angle de transformation de Park ou angle de Park .

Ces transformations utilisées doivent conserver non seulement la puissance instantanée, mais aussi, la réciprocité des inductances mutuelles, ce qui permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé qui reste variable pour la machine réelle .



**FigI-7** : Représentation spatiale de la transformation triphasée/biphasée.

D’après la figure il est possible de définir une matrice  $[P(\theta)]$ , permettant le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes  $X_{dq0}$  du système biphasé tournant à la même vitesse .

$$[P](\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I-7)$$

$\theta$  : étant l'angle entre l’axe «  $as$  » du stator et l’axe «  $ds$  » du référentiel de park.

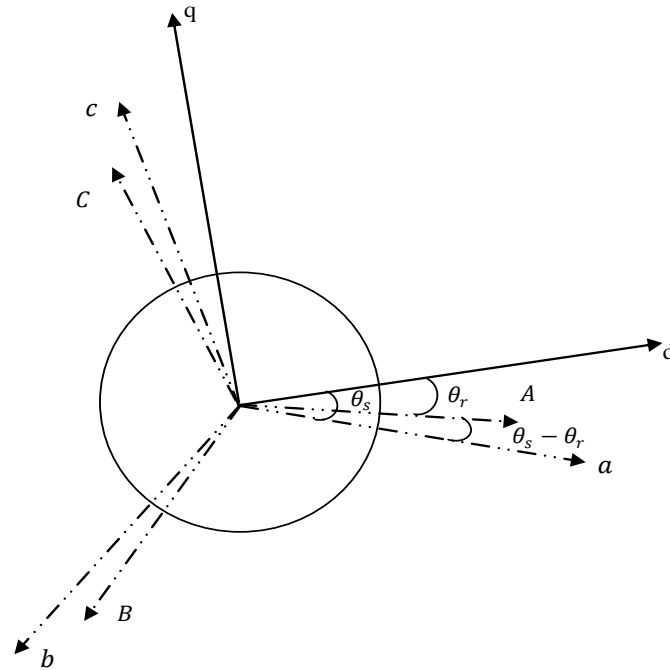
La matrice de changement de base  $[P](\theta)$  étant orthonormée, aussi le calcul de sa matrice inverse est très simple définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

$$[P]^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I-8)$$

**I-11 Application aux équations de la machine :**

La transformation de Park peut être représentée par la figure (I-8).



**Fig I-8 :** représentation angulaire des systèmes d’axes dans l’espace électrique.

Avec :

$\theta_r$  : Angle entre la phase « a » statorique et l’axe « d » de Park.

$\theta_s$  : Angle entre la phase « a » statorique et l’axe « d » de Park.

$\theta_s - \theta_r$  : Angle entre la phase « A » rotorique et l’axe « a » statorique.

**I-11-1-Equations des tensions :**

Dans le repère biphasé de Park d’axe « dq » tournant à la vitesse de rotation du référentiel, les équations électriques de tensions s’écrivent:

**Au stator**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (I-9-a)$$

**Au rotor**

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (I-9-b)$$

**I-11-2-Equations des flux :**

Dans se même repère les équations de flux s'écrivent :

**Au stator**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \end{cases} \quad (I-10-a)$$

**Au rotor**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} \end{cases} \quad (I-10-b)$$

Avec:

$\omega_s = d\theta_s / dt$  la vitesse de rotation du référentiel.

$\omega_r = p \cdot \Omega = p \cdot d\theta_r / dt$  la vitesse électrique de rotation du rotor.

$L_s, L_r$  : Inductances propres cycliques du stator et du rotor respectivement :

$L_s = L_{as} - M_{as}$  et  $L_r = L_{ar} - M_{ar}$ .

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor ( $L_{sr} = 3/2 M_{sr}$ ).

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

**I-11-3-Équations mécaniques :**

D'une manière générale, l'expression du couple, pour une machine à «P» paires de pôles, est donnée par :

$$C_{em} = \frac{pL_{sr}}{L_r} (i_{qs} \Phi_{dr} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (I-11)$$

**I-12 Choix du référentiel :**

Il existe trois différents types de référentiels : un lié au rotor, l'autre au stator, et un autre au champ tournant, le choix est lié au type de problème étudié.

**I-12-1-Référentiel lié au stator :**

Ce référentiel est immobile par rapport au stator et est adopté pour l'étude du démarrage et freinage des machines à courant alternatif avec branchement de résistances .

Il est caractérisé par, ( $\omega_s = 0$ ), donnant les équations électrique suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{I-11-a})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} + \omega_r \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{I-11-b})$$

Ce référentiel est également très intéressant dans le cas où l'on veut étudier la variation de la vitesse de rotation avec une fréquence d'alimentation fixe .

**I-12-2-Référentiel lié au rotor :**

Ce référentiel est immobile par rapport au rotor.

Il est caractérisé par, ( $\omega_r = 0$ ), donnant les équations électrique suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{I-12-a})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{I-12-b})$$

Ce référentiel est choisi en vue de l'étude des problèmes qui apparaissent durant les régimes transitoires où l'entraînement est à vitesse constante alors que la fréquence d'alimentation varie [10]. Citons, à titre d'exemple, la commande  $v/f = \text{cst}$ .

### I-12-3-Référentiel lié au champ tournant :

C'est un référentiel immobile par rapport au champ tournant avec ( $\omega = \omega_s$ ), les équations électriques s'écrivent comme :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{I-13-a})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qs} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{I-13-b})$$

Il est à préciser que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplifications dans les équations de la machine et est principalement utilisé dans le cas de commande en vitesse avec variation et/ou non de la fréquence d'alimentation du système. Il est à noter que dans notre étude ce référentiel a été adopté .

### I-13-Représentation d'état du modèle de la machine asynchrone :

En considérant d'une part, les tensions statoriques ( $V_{ds}, V_{qs}$ ), et la pulsation  $\omega_s$  comme variables de commande et d'autre part, les courants statorique ( $I_{ds}, I_{qs}$ ), les flux rotoriques ( $\phi_{dr}, \phi_{qr}$ ) et la vitesse mécanique  $\Omega_r$ , comme variables d'état, la représentation d'état du modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère lié au champ tournant est donnée par la forme matricielle suivante :

$$\dot{[x]} = [A][X] + [B][U] \quad (\text{I-14})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \omega_s & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r} \omega_r \\ \omega_s & \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r} \omega_r & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{L_{sr}}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_{sr}}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \text{ et } [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-15})$$

$[X]$  : Vecteur d'état,  $X = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]^t$

$[U]$  : Vecteur de commande,  $U = [V_{ds} \ V_{qs} \ 0 \ 0]^t$

La combinaison des équations (I-9),(I-13), nous permet d'aboutir au système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} [-R_s i_{ds} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} + \frac{L_{sr}}{L_r T_r} \Phi_{dr} + \omega_r \frac{L_{sr}}{L_r} \Phi_{qr} + V_{ds}] \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} [-R_s i_{qs} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \frac{L_{sr}}{L_r T_r} \Phi_{qr} + \omega_r \frac{L_{sr}}{L_r} \Phi_{dr} + V_{qs}] \\ \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = \frac{L_{sr}}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = \frac{L_{sr}}{T_r} i_{qs} - \frac{1}{T_r} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \\ C_{em} = \frac{p L_{sr}}{L_r} (i_{qs} \Phi_{dr} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{d}{dt} \Omega_r = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - K_f \Omega_r) \end{array} \right. \quad (I-16)$$

Avec :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  et  $\sigma = 1 - \frac{L_{sr}^2}{L_s L_r}$

### I-14 Simulation numérique :

Dans un premier temps, nous considérons que la machine est connectée en étoile et alimentée par un système de tension triphasé équilibré sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin(2\pi f * t - 2\pi/3) \\ \sin(2\pi f * t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad (I-17)$$

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel « *MATLAB simulink* » pour la simulation du comportement dynamique de la machine asynchrone triphasée. Nous avons utilisé un démarrage à vide avec application d'un couple de charge  $C_r=30\text{N.m}$  à  $t=0.5\text{s}$ .

Les paramètres nominaux de la machine utilisée sont donnés à l'annexe (A), et les résultats obtenus sont représentés dans la figure (I-10).



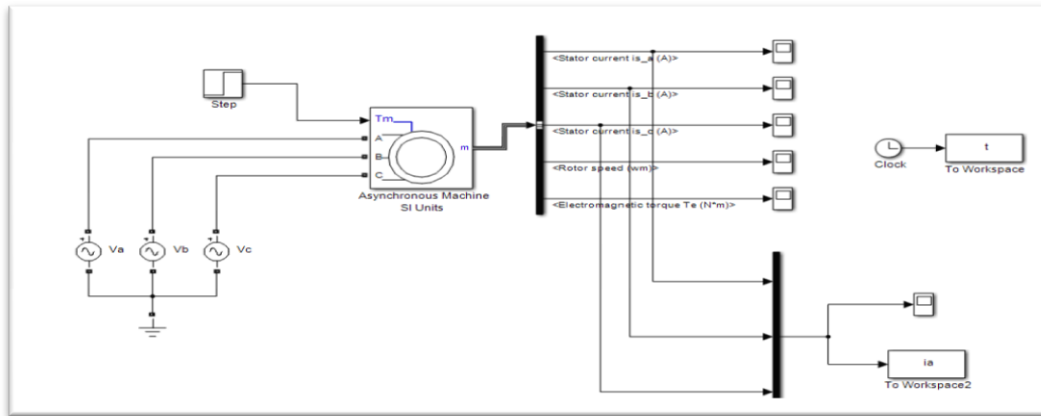
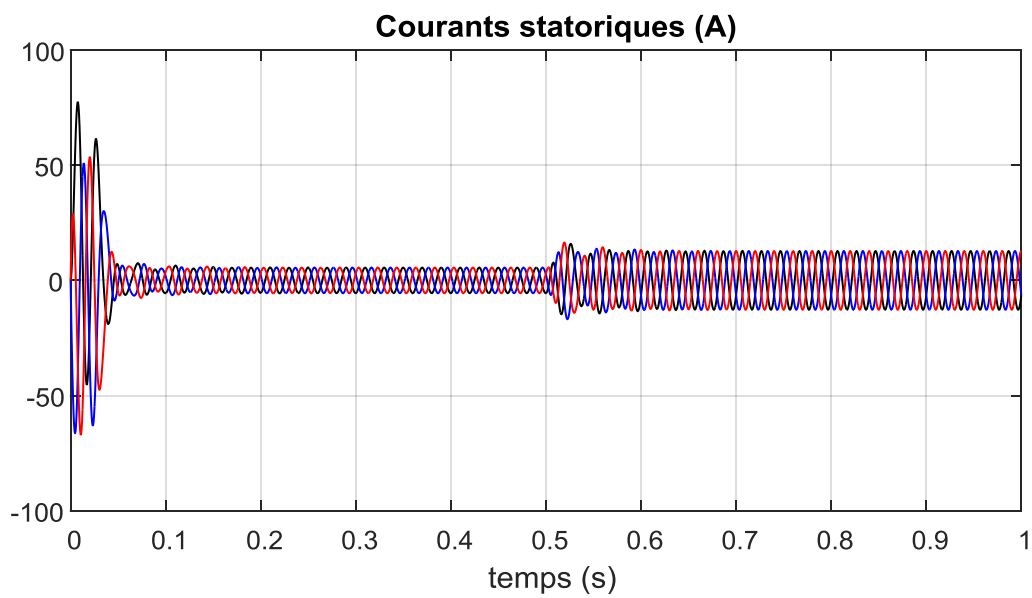
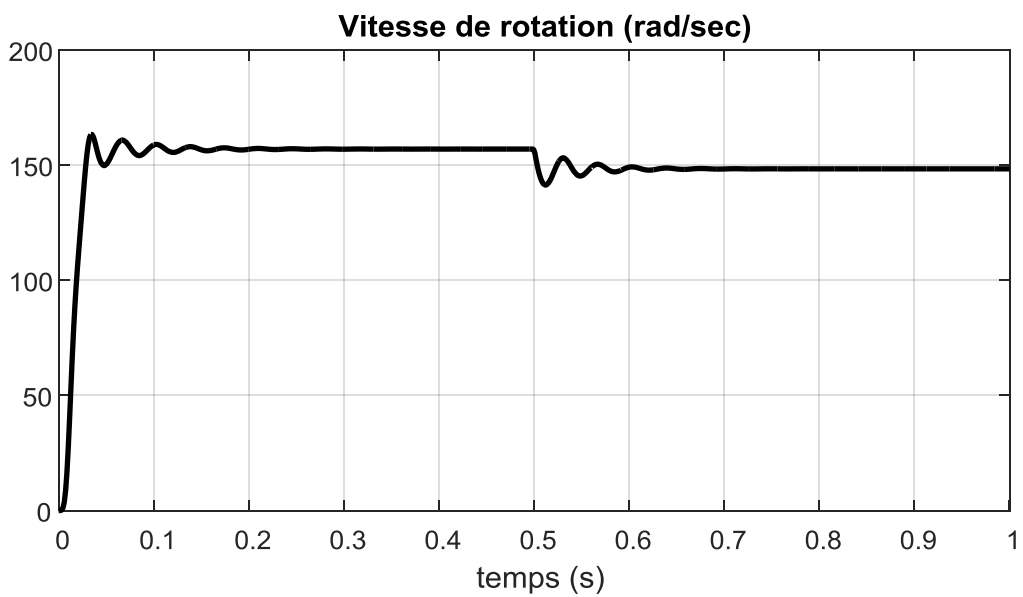


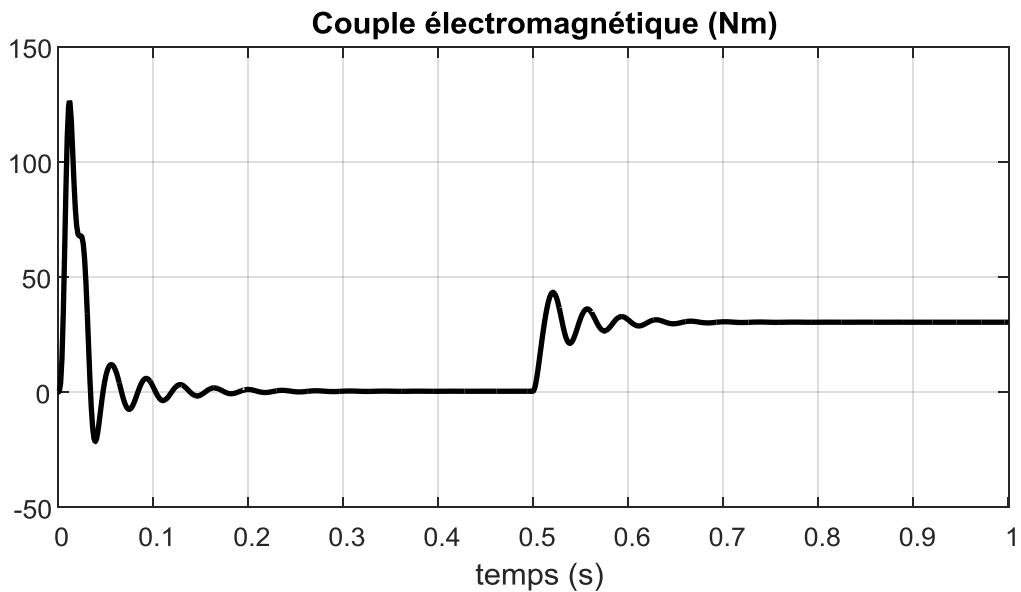
Fig I.9 Schéma de simulation sous Simulink



a) - Courants statoriques



b)- vitesse de rotation



c)- Couple électromagnétique.

**Fig I.10 Résultats de simulation d'un démarrage à vide suivi d'application d'une charge de 30 Nm à t=0.5 s**

### I-15 Interprétation des résultats de simulation :

On remarque que le régime transitoire est oscillatoire est dure (0.2s) pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (157rad/s). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (130N.m) au régime transitoire, on note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers faible valeur due l'effet réactif de la MAS.

Lors de l'application de la charge, nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse, le couple électromagnétique augmente et prend la valeur du couple de charge (30 Nm).

### I.16 Conclusion :

Après quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone, ainsi que sur les défaillances pouvant affecter cette machine (excentricité, court-circuit, rupture des barres...), on a présenté les différentes techniques de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil, et nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, sont basées sur le contenu spectral de signaux et le plus souvent à partir du courant absorbé par la machine asynchrone.

La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement (sain ou avec défaut). En appliquant la transformation de Park. Les résultats obtenus par simulation montrent bien la validité du modèle de Park, dans le référentiel lié au stator. Ce modèle présente l'état normal de la machine asynchrone c'est-à-dire l'état sain.

**CHAPITRE II**  
**Détection de Défauts**  
**dans l'association**  
**Convertisseur -MAS**

## II.1 INTRODUCTION :

Actuellement un grand axe de recherches est orienté vers la surveillance de l'état du convertisseur alimentant le moteur asynchrone. 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 contexte, le présent chapitre porte sur l'application de deux approches dédiées à la détection et au diagnostic des défauts dans l'onduleur alimentant le moteur asynchrone.

La première approche est basée sur l'analyse du contour de Park du courant statorique.

La deuxième utilise l'analyse de la fréquence instantanée du vecteur courant statorique.

## II.2. Onduleur de tension triphasé :

Les onduleurs de tension, associés aux machines à courant alternatif, sont de nos jours très largement utilisés dans les systèmes d'entraînement industriels. En premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation de convertisseurs statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques, notamment l'utilisation sans cesse grandissante des processeurs de signaux (DSP "Digital Signal Processing") [5], permet désormais d'exécuter en temps réel des algorithmes complexes de contrôle des convertisseurs [6].

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne [7].

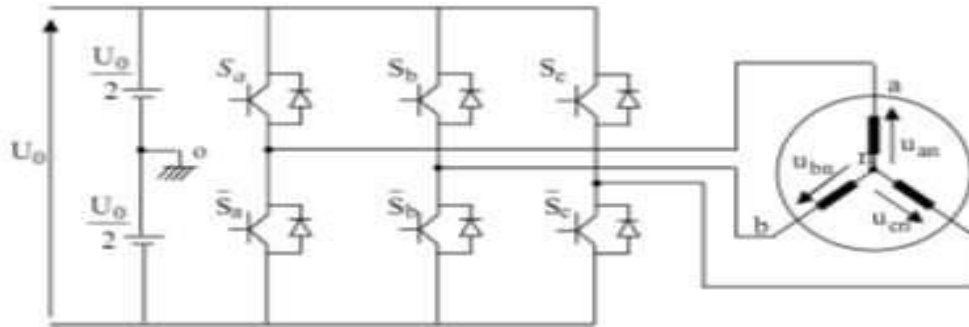
$S_{abc} = 1$  : Interrupteur du demi-bras haut (a, b ou c) fermé.

$S_{abc} = 0$  : Interrupteur du demi-bras bas (a, b ou c) ouvert.

La Fig II.1 montre le schéma d'un onduleur triphasé avec sa charge [7].

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée ;
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.



**Fig II.1 Schéma d'un onduleur de tension triphasé avec sa charge**

On peut montrer que les tensions simples s'écrivent en fonction des tensions composées  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  et  $U_{ca}$  sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{S_a} = \frac{1}{3}(u_{S_{ab}} - u_{S_{ca}}) \\ v_{S_b} = \frac{1}{3}(u_{S_{bc}} - u_{S_{ab}}) \\ v_{S_c} = \frac{1}{3}(u_{S_{ca}} - u_{S_{bc}}) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Les tensions simples en fonction des signaux de commande sont données comme suit :

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{U_0}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_{bn} = \frac{U_0}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ U_{cn} = \frac{U_0}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{I-2})$$

Les couples d'interrupteurs d'onduleur, doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants .

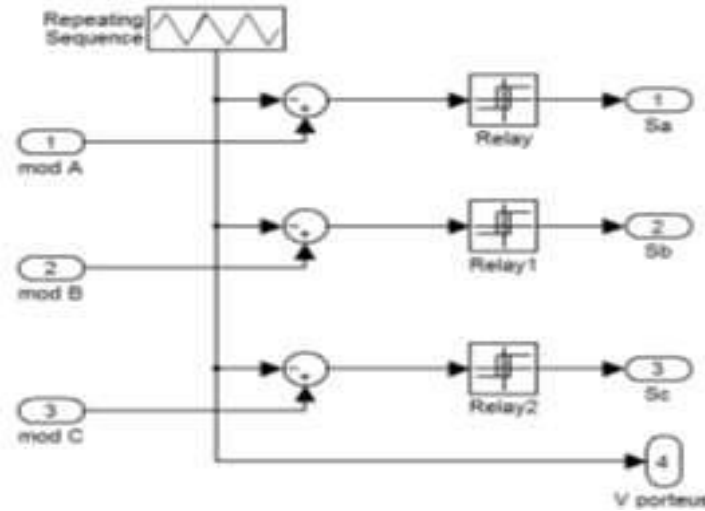
Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. La stratégie la plus utilisée est la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

### II.2.1 Commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes du moteur des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension. A l'aide d'un signal

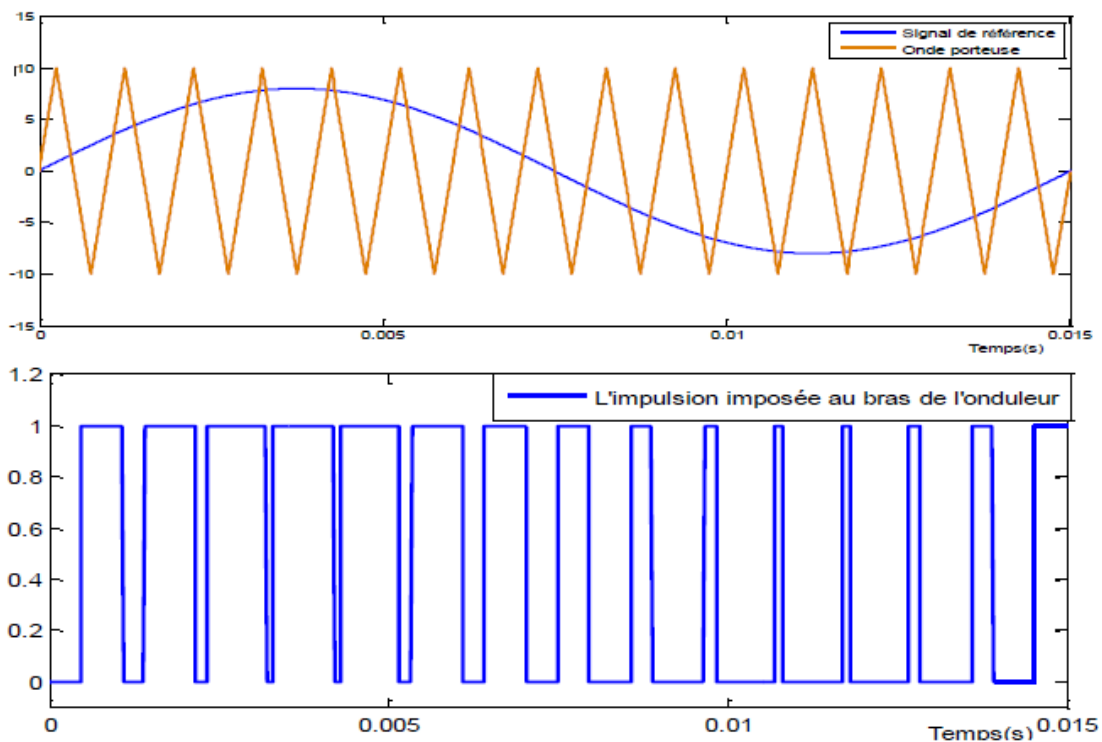
triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué [5]. [7]. [6].

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



**Fig II.2 : Schéma de principe de la technique MLI.**

La détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI est donnée par la figure II.3



**Fig II.3 Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI**

### II.3 Différent type de défaut d'onduleur :

#### II.3.1 Court-circuit sur un interrupteur :

Sur un onduleur triphasé à trois bras, un court-circuit sur un interrupteur (Figure II .4) empêche tout fonctionnement. Ce court-circuit rend inutilisable un des bras car si le deuxième interrupteur de ce même bras est commandé, la source serait alors court-circuitée. La conséquence principale de la mise en court-circuit d'un des transistors sur le fonctionnement de l'onduleur est l'apparition de deux chemins de circulation incontrôlable du courant, ceux-ci passant par les diodes contenues dans les interrupteurs.[9]

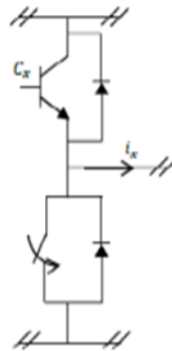


Figure II.4 court-circuit sur un interrupteur d'un des bras

#### II.3.2 Circuit ouvert sur un interrupteur :

Un interrupteur bloqué en ouverture (Figure.II.5) n'a pas les mêmes conséquences qu'un interrupteur en court-circuit. Un tel scénario peut arriver par exemple si l'interrupteur ne reçoit plus les commandes de fermeture. Ce cas présente l'avantage de ne pas court-circuiter la diode mise en parallèle dans l'interrupteur, n'empêchant donc pas complètement le fonctionnement du moteur. Il est rapidement possible d'imaginer les conséquences de cette faute sur la production de couple si les autres interrupteurs sont toujours commandés normalement.[9]

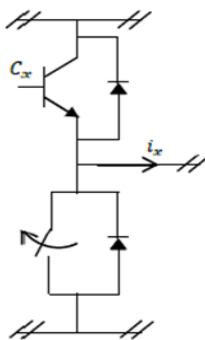


Figure II.5 Circuit ouvert sur un interrupteur d'un des bras



Le courant de la phase présentant le défaut est tronqué soit de sa partie négative, soit des parties positives suivant l'interrupteur touché, modifiant la forme des courants des autres phases. Une chute du couple apparaît alors dans cette zone, et donc une discontinuité dans la production. Ces discontinuités rendent le contrôle du moteur très difficile voire impossible à cause des passages par zéro du couple global produit.

### **II.3.3 Court-circuit de deux interrupteurs :**

Ce cas est spécifique par rapport aux précédents cas cités. En effet, pour que ce cas apparaisse, il faut que l'onduleur soit victime d'une double faute. Il faut différencier deux cas pour ces doubles fautes. Le premier concerne deux courts-circuits sur deux bras différents. Pour une machine pilotée sur trois phases avec un onduleur à trois bras, cela signifie l'arrêt inévitable du moteur qui ne peut plus être alimenté. Si de plus les courts-circuits concernent un interrupteur connecté au positif du bus continu et l'autre connecté au négatif, un courant continu de défaut est créé passant par les deux phases concernées et pouvant aller jusqu'à la détérioration du moteur, la résistance des bobines étant faible.

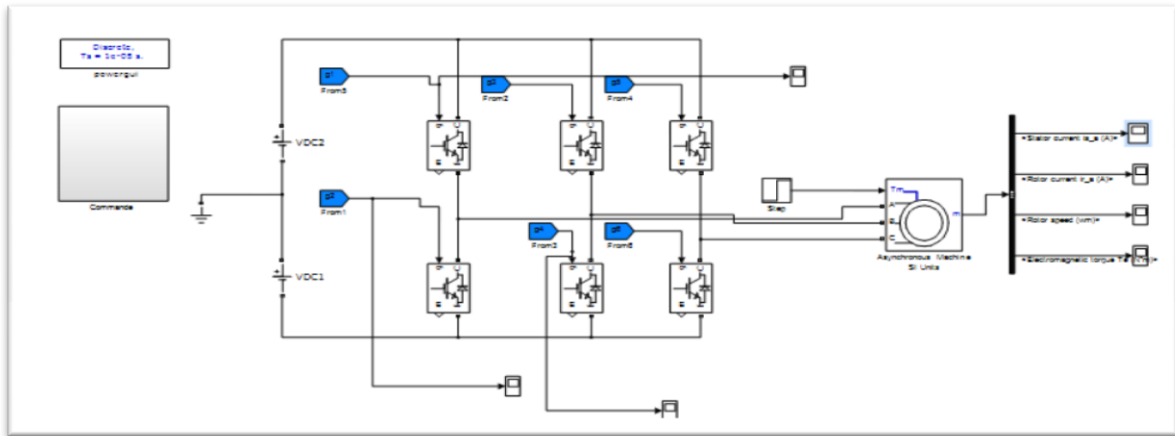
Le second cas est plus grave car il concerne les courts-circuits de deux interrupteurs sur un même bras. La source se trouve alors en court-circuit, ce qui pourrait, en plus de neutraliser la machine électrique, détériorer une autre partie du système. Pour cette faute, et de manière générale pour toute faute entraînant un court-circuit de la source, un système de déconnexion de l'alimentation doit être prévu pour isoler au moins la partie défectueuse. Cette double faute peut donc être critique, causant l'impossibilité d'utiliser un moteur classique, et une problématique importante pour la tolérance d'une telle double faute.[9]

### **II.3.4 Circuit ouvert de deux interrupteurs :**

Ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ses deux interrupteurs restant ouverts. La phase n'est plus connectée qu'à travers les diodes antiparallèles de la cellule de commutation, la conduction spontanée d'une des diodes du bras en défaut dépend des forces électromotrices développées par la machine et des commandes des bras restants. Le courant dans la phase concernée est assez faible, voire quasiment nul, selon la commande effectuée et les courants dans les phases saines ont leurs fondamentaux en opposition de phase. Si la défaillance survient à haute vitesse, la durée de conduction des diodes se trouve augmentée. Comme les diodes restituent de l'énergie vers le bus continu, la valeur moyenne du couple produit s'en trouve réduite.

**II.4 Simulation du moteur asynchrone en absence de défaut (sain) :**

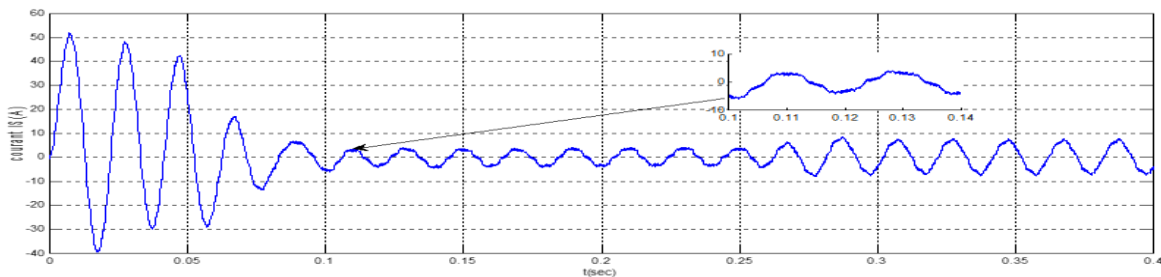
La simulation présentée par la suite est réalisée sur un moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé selon le principe de la MLI. Avec les valeurs de la fréquence de la porteuse  $f_p= 5000\text{Hz}$  et un temps de simulation de 0.4s. Dans cette simulation, Nous avons simulé le modèle de moteur asynchrone dont les paramètres sont indiqués dans l'annexe A. Les résultats de simulation sont obtenus avec modèle de MAS avec et sans défaut, On applique une charge de 10Nm



**Fig II.6 Modèle de simulation de MAS associé un onduleur à MLI**

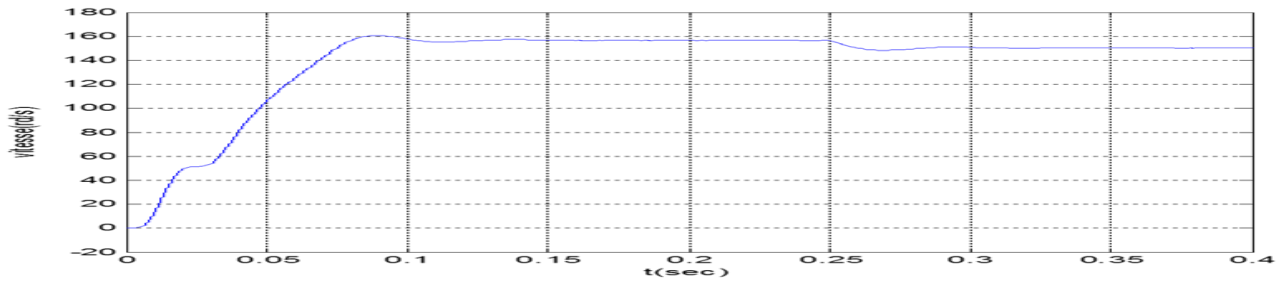
**II.4.1 Résultats de simulation**

Dans cette simulation le moteur asynchrone est alimenté par un onduleur de tension lors d'un démarrage avec suivi de l'application d'une charge égale 10N à l'instant  $t=0.25$



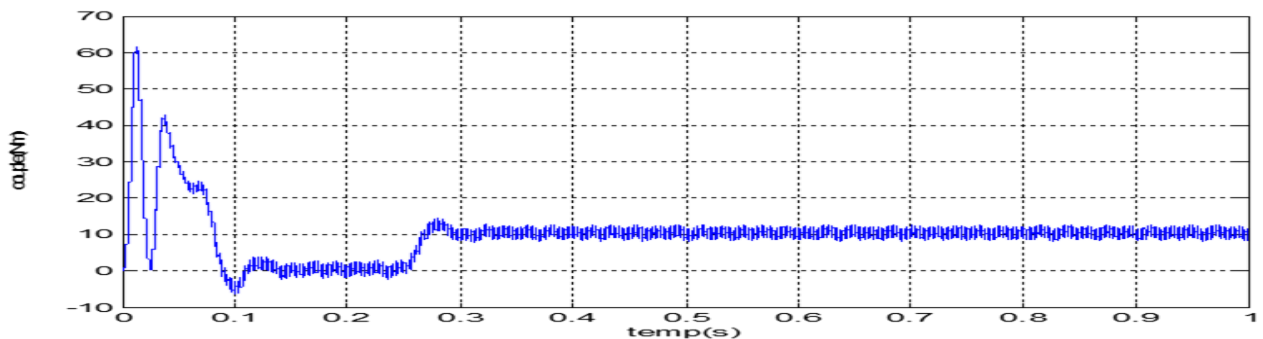
**FigII.7 Courant statorique de MAS avec onduleur dans l'état sain**

La figure (II.7) montre le courant statorique d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tensions. On remarque une augmentation du courant statorique ( $I_{Sa}$ ) de la valeur 2.4A à la valeur 9.7A à l'instant de  $t=0,25\text{s}$ .



**Fig II.8 Vitesse de rotation avec onduleur sans défaut**

La figure (II.9) montre la vitesse du moteur, nous remarquons que la forme de la vitesse change de la valeur 157 (rd/s) à la valeur 150 (rd/s) à l'instant d'application de la charge  $t=0,25$  s



**Fig II.9 Couple de MAS avec onduleur sans défaut**

La figure (II.10) montre le couple du moteur asynchrone, nous remarquons une augmentation de couple électromagnétique de la valeur 0 (Nm) à vide, à la valeur 10 (Nm) à l'instant de  $t=0,25$  s.

## II.5 Simulation du moteur asynchrone en présence de défauts d'onduleur :

Cette simulation est réalisée dans les conditions suivantes :

- 1- Deux interrupteurs de puissance à l'état *OFF* (circuit ouvert d'une phase).
- 2- Deux interrupteurs de puissance à l'état *ON* (court-circuit d'une phase).
- 3- un interrupteur de puissance à l'état *OFF* (circuit ouvert d'un interrupteur).
- 4- un interrupteurs de puissance à l'état *ON* (court-circuit d'une interrupteur).

Le schéma bloc de simulation de défauts d'onduleur est donné par la fig II-11 :

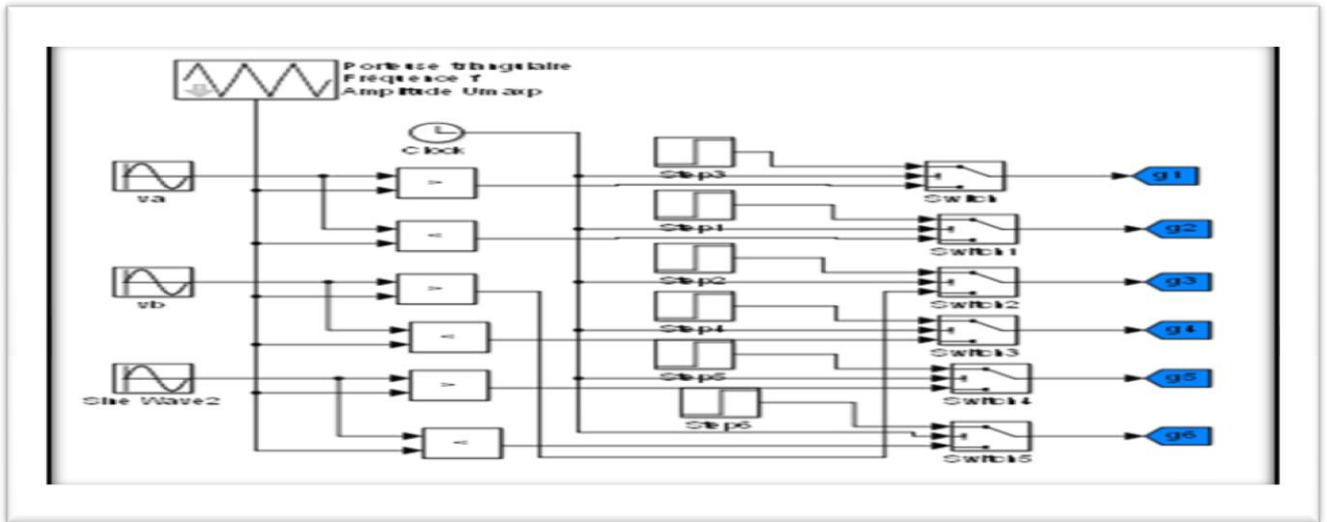


Fig II.10 Simulateur de défauts d'onduleur de tension

II-5-1 Résultats de simulations

II-5-1-1 Défauts de court-circuit

Les résultats de la simulation pour les défauts de court-circuit sont présentes sur les Figures (II.12), (II-13), (II-14) e

- Court-circuit sur un interrupteur (interrupteur haut G1)

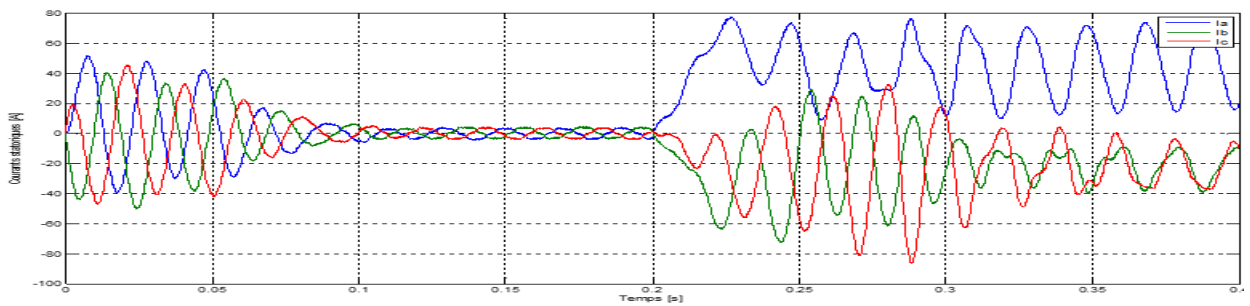
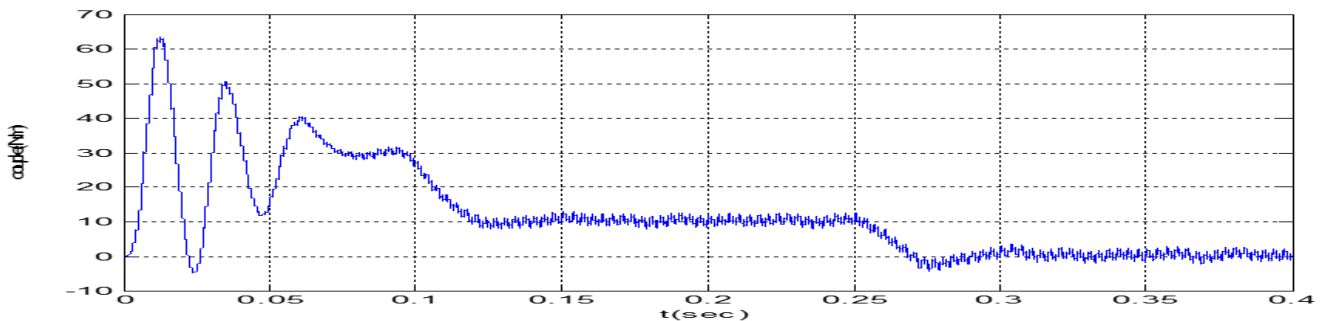
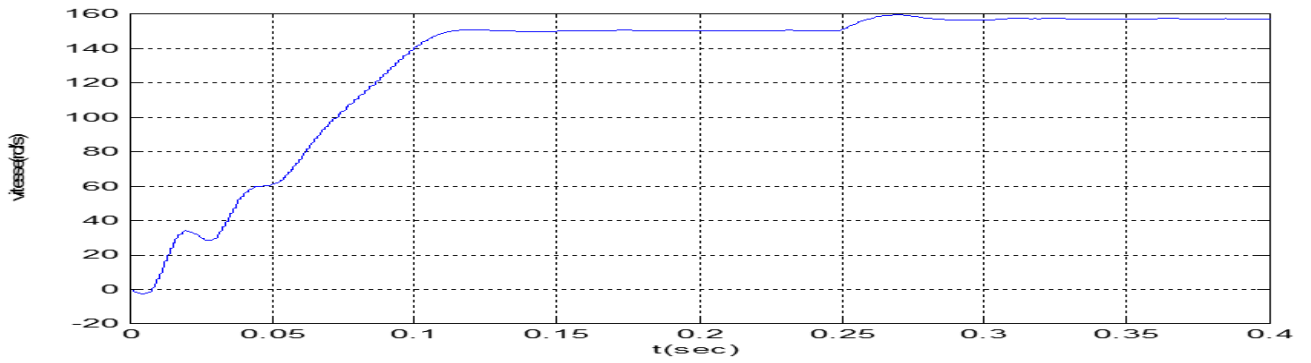


Fig II.11 Courants sataoriques lors d'un court-circuit sur un interrupteur



FigII.12 Couple électromagnétique lors d'un court-circuit sur un interrupteur



FigII.13Vitesse de rotation lors d'un court-circuit sur un interrupteur

- Court-circuit sur deux interrupteurs (demême bras, G1 et G2)

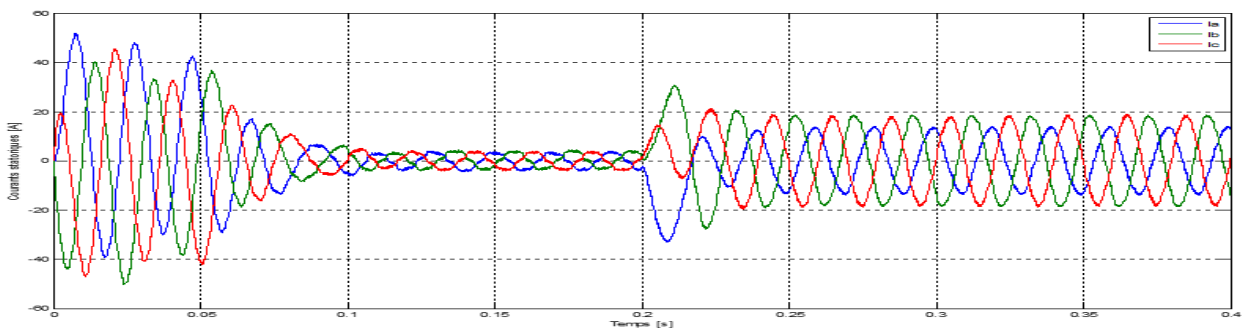


Fig II.154Courants statoriques lors d'un court-circuit sur deux interrupteurs

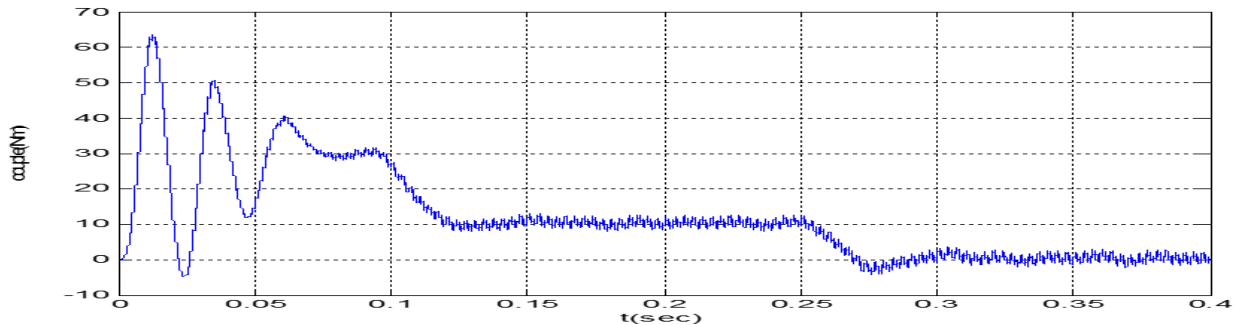
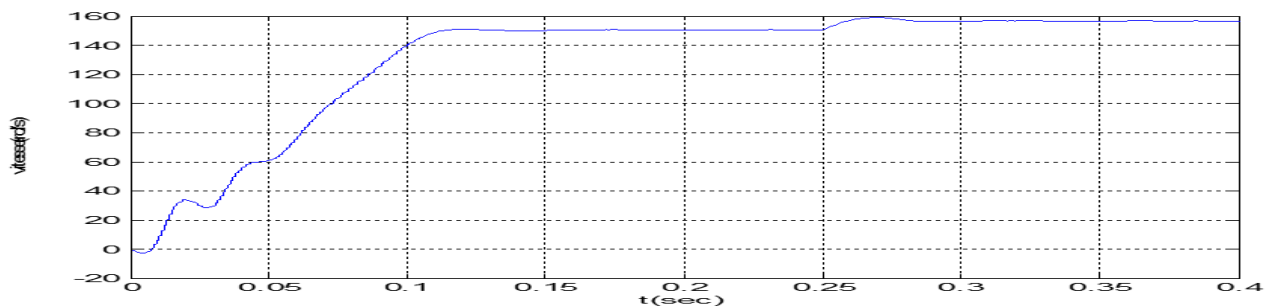


Fig II.15 Couple électromagnétique lors d'un court-circuit sur deux interrupteurs



FigII.16Vitesse de rotation lors d'un court-circuit sur deux interrupteurs

II-5-1-2 Défauts de circuit ouvert

- Circuit ouvert d'un interrupteur (interrupteur haut G1)

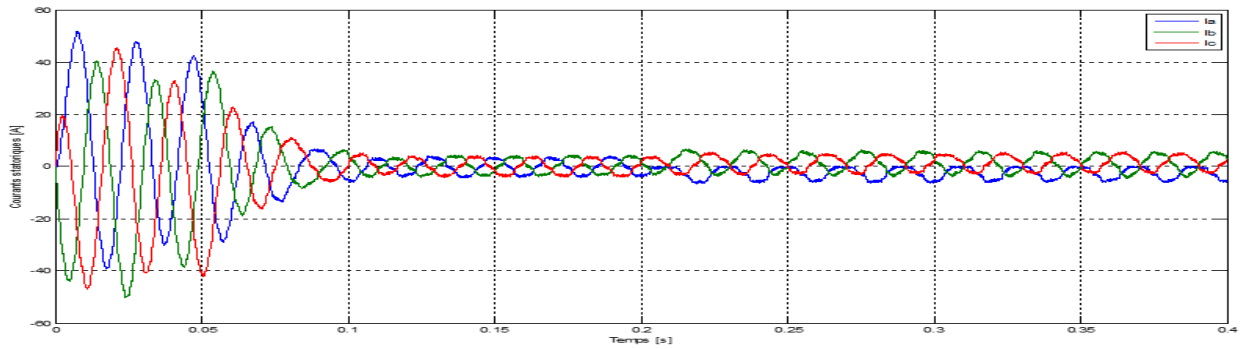


Fig II.17 Courants statoriques lors d'un défaut de circuit ouvert d'un interrupteur

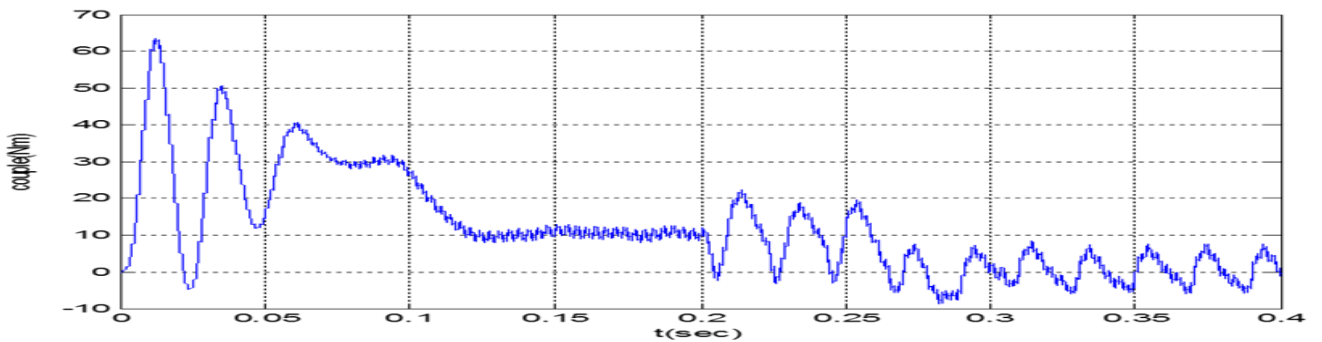


Fig II.18 Couple électromagnétique lors d'un défaut de circuit ouvert d'un interrupteur

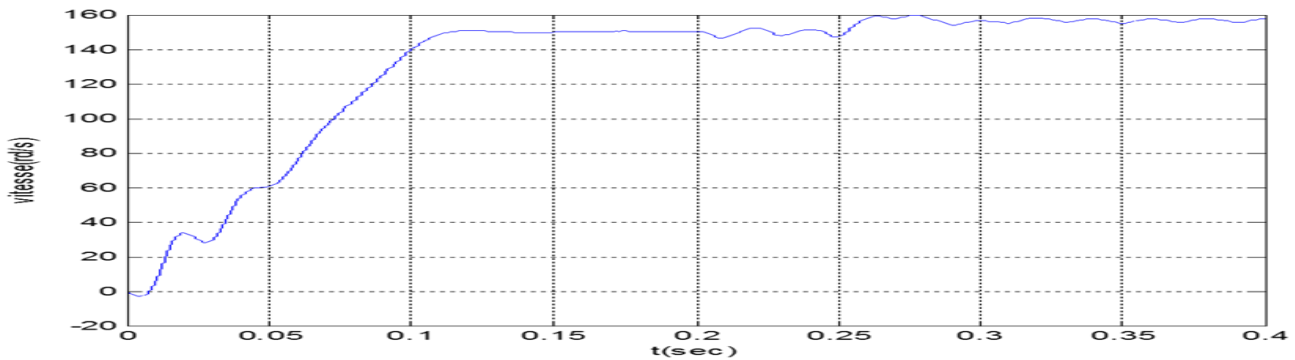
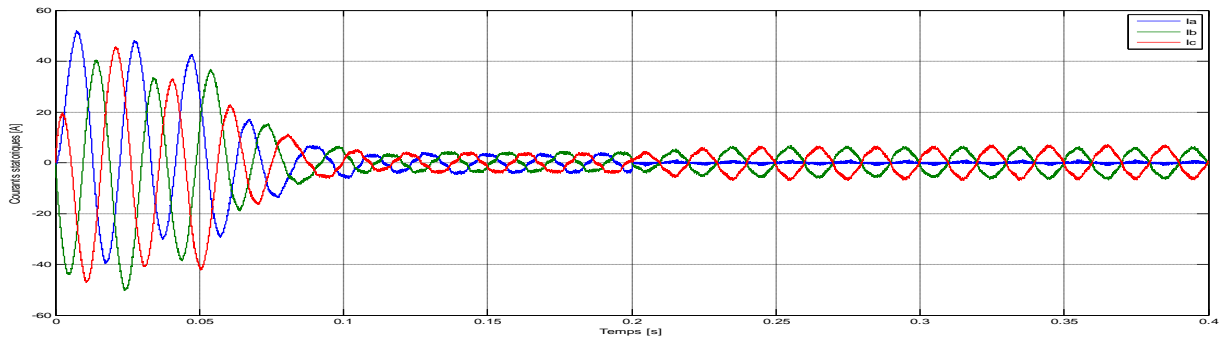
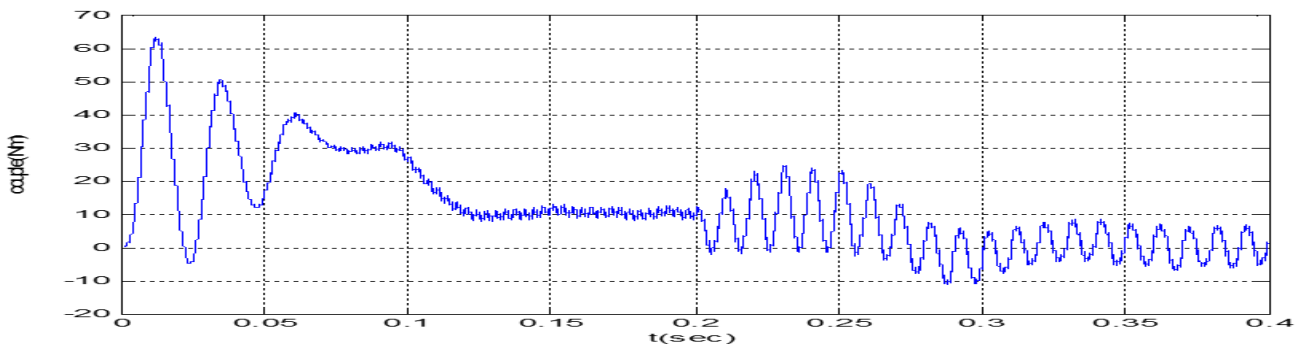


Fig II.19 Vitesse de rotation lors d'un défaut de circuit ouvert d'un interrupteur

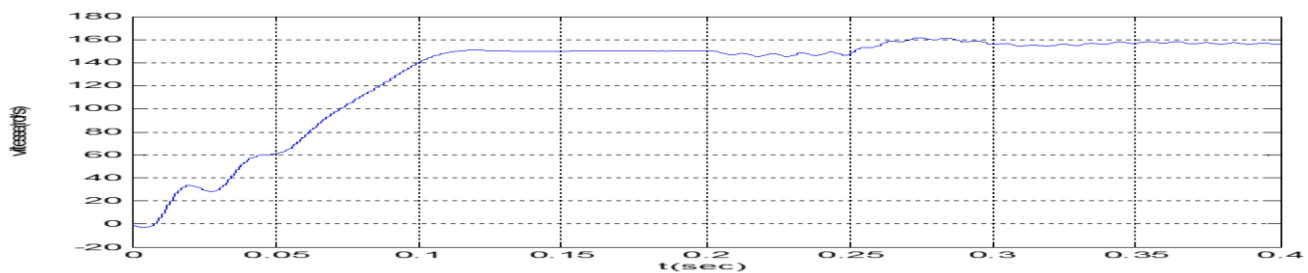
- **Circuit ouvert de deux interrupteurs (deux même bras ,G1 et G2)**



**Fig II.20 Courants statoriques lors d'un défaut de circuit ouvert de deux interrupteurs**



**Fig II.21 Couple électromagnétique lors d'un défaut de circuit ouvert de deux interrupteurs**



**Fig II.22 Vitesse de rotation lors d'un défaut de circuit ouvert de deux interrupteurs**

**II .5.2 Interprétation des résultats :**

La simulation est réalisée dans les conditions suivantes :

- 1- Un et deux interrupteurs de puissance à l'état OFF (circuit ouvert).
- 2- Un et deux interrupteurs de puissance à l'état ON (court-circuit).

Le schéma bloc de simulation des défauts d'onduleur est donné par la fig (II.11) :

- Afin d'introduire le défaut de court-circuit, les de signaux de commande G1 et G2 sont forcés à "1" pendant l'instant d'application de défaut

Les résultats de la simulation pour le défaut de court-circuit sont présents sur les Figures (II-12) à (II-17), les courants statoriques produisent un couple fortement oscillant et résistant en valeur moyenne qui influe sur le moteur

- Dans le cas de défauts de circuit ouvert le moteur, est alimenté par les deux phases, car aucun courant ne circule dans l'enroulement de phase de défaut. Nous utilisons le signal de commande de l'IGBT de l'onduleur pour introduire un défaut de circuit ouvert de la phase "a", dans ce cas les deux signaux de commande G1 et G2 sont forcés à "0" à l'instant d'application de défaut

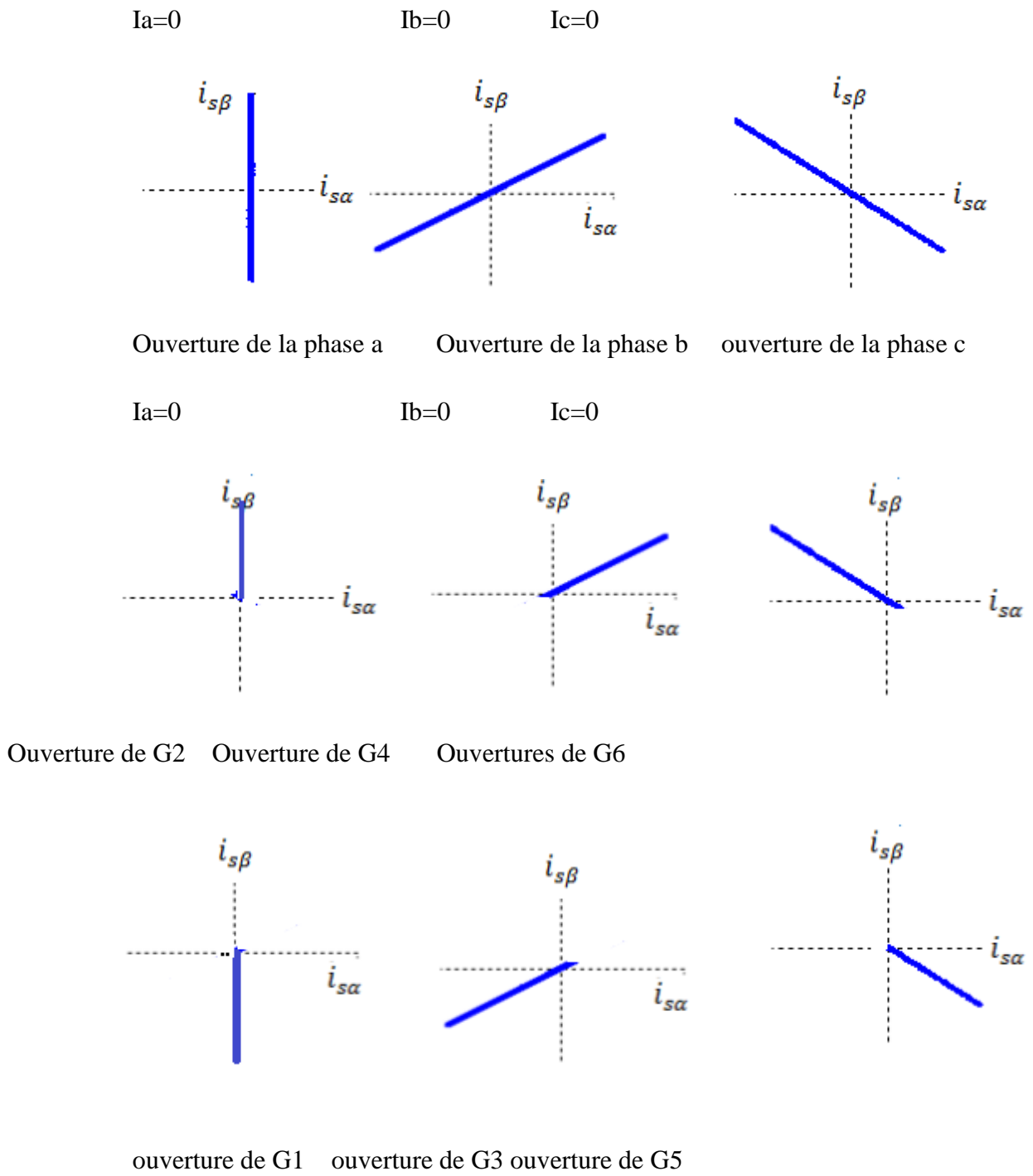
### II.6 Diagnostic des défauts par analyse des courants statoriques dans le repère de Concordia :

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des machines asynchrones triphasés. Une des plus connues repose sur le calcul des courants et tensions dits de Concordia. Elle utilise les grandeurs biphasées qui sont calculées à partir des trois courants et tensions d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous. Les courants et les tensions biphasés sont donnés par l'expression suivante [10] :

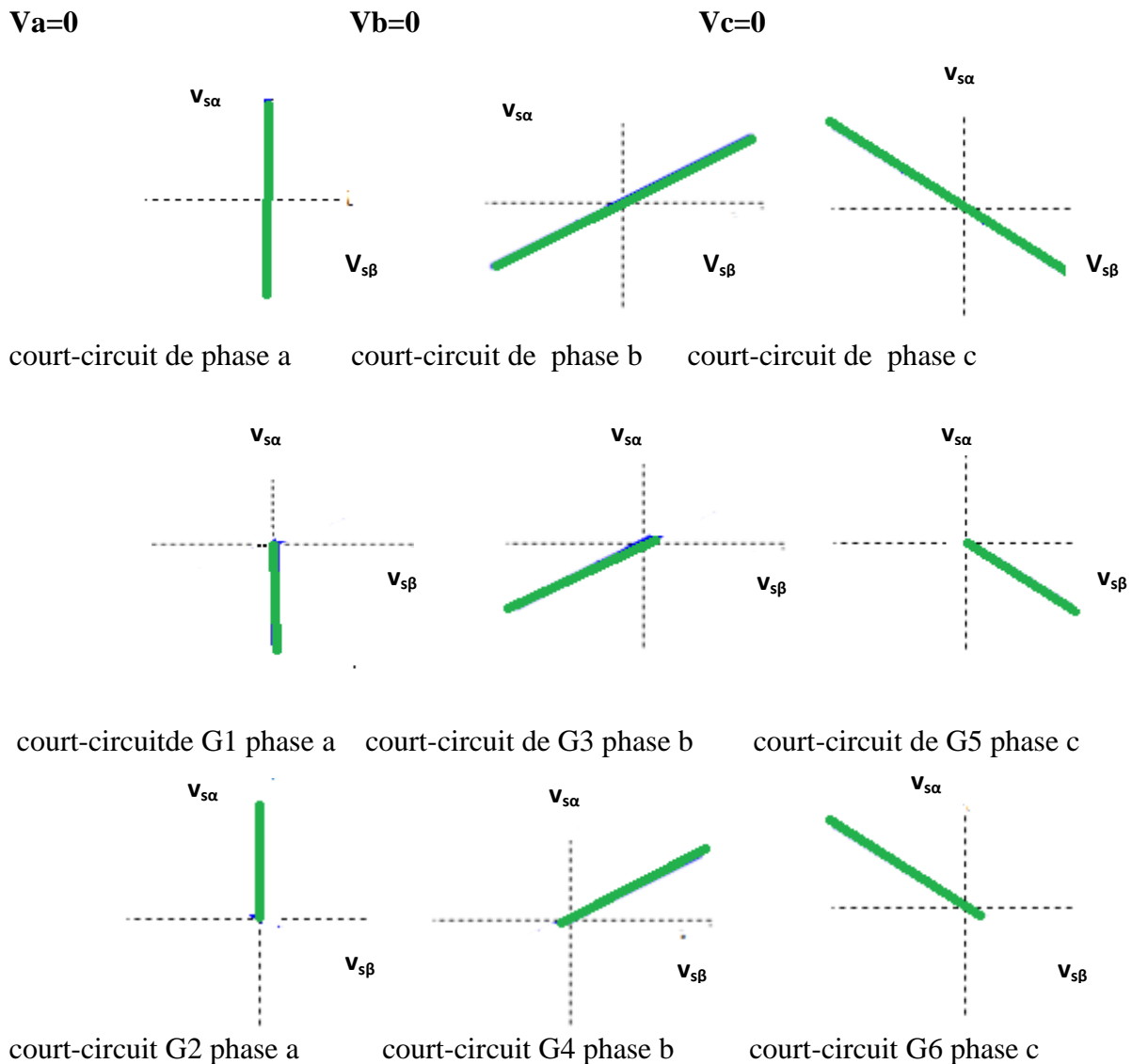
$$3) \quad \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-})$$

Le changement de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut. Les figures II-24 et II-25 montrent les signatures de défaut qui sont basées sur une représentation bidimensionnelle des courants statoriques





**Fig II.23 Représentation bidimensionnelle des courants statoriques lors d'un défaut de circuit ouvert**



**FigII.24 Représentation bidimensionnelle des courants statoriques lors d'un défaut de court-circuit**

Les figures (II.24) et (II-25) illustrent les trajectoires des courants statoriques pour les différents défauts d'une phase statorique. Ces signatures permettent ainsi la détection de défauts d'une phase statorique. Cette technique est connue sous le nom de détection de défaut à base de reconnaissance des formes

### II.7 Détection des défauts par traitement du signal :

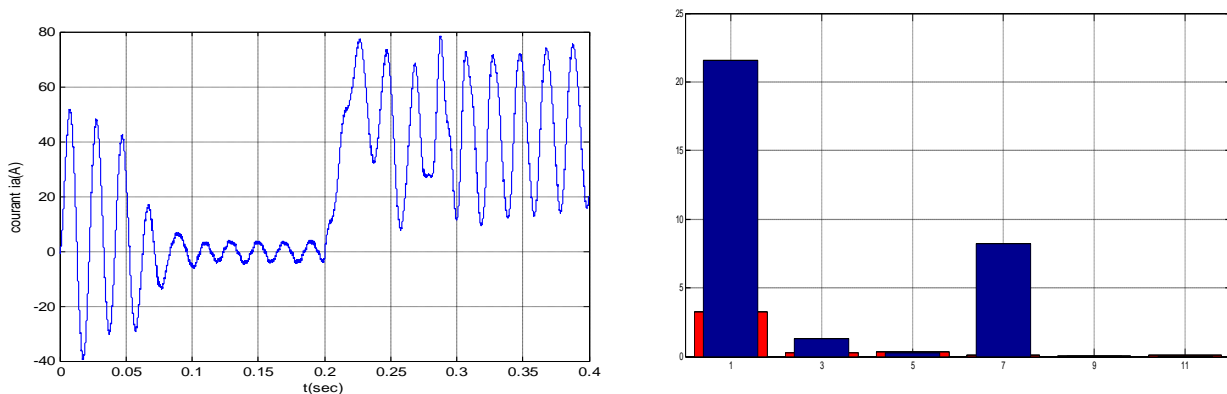
L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de MAS à partir des informations données par des capteurs non invasifs. Les signaux utilisés sont les tensions, les courants et les flux de MAS. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter les défauts électriques entre phases ou des déséquilibres dans l'alimentation au niveau du stator. La méthode de traitement

numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT) sous sa forme réelle et complexe ainsi que la transformée de Fourier discrète (DFT). [BES07]. Dans la littérature, les techniques les plus répandues pour la détection des courts-circuits entre-spores sont basées sur l'analyse des courants statoriques. Ces méthodes, couramment appelées MCSA (Motor Current Signal Analysis), présentent l'avantage de n'utiliser que des capteurs de courant, qui sont souvent déjà présents dans les systèmes pour la commande et/ou la surveillance de moteur. Parmi ces méthodes, le diagnostic par analyse spectrale sur les courants statoriques consiste à détecter des raies aux fréquences caractéristiques du défaut. En effet, les perturbations des forces magnétomotrices, induites par un défaut d'onduleur, entraînent la présence d'harmoniques supplémentaires dans les courants statoriques de moteur et permettent ainsi la détection de la défaillance. Dans cette méthode en détectant l'apparition d'une composante à  $(3 \cdot f_s)$  sur les courants de ligne sur un MAS défaillant.[10]

### II.7.1 Résultats de simulation de détection des défauts par traitement de signal :

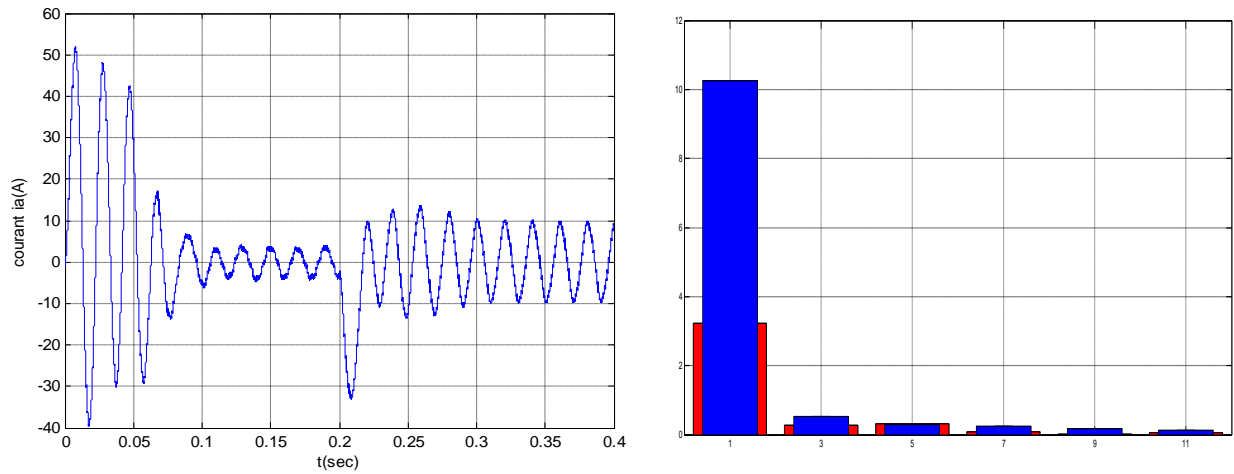
Le modèle proposé pour le défaut de court-circuit a été mis en œuvre dans le logiciel Matlab/Simulink®.

- **Court-circuit sur un et deux interrupteurs :**



#### Court-circuit de G1 spectre harmonique

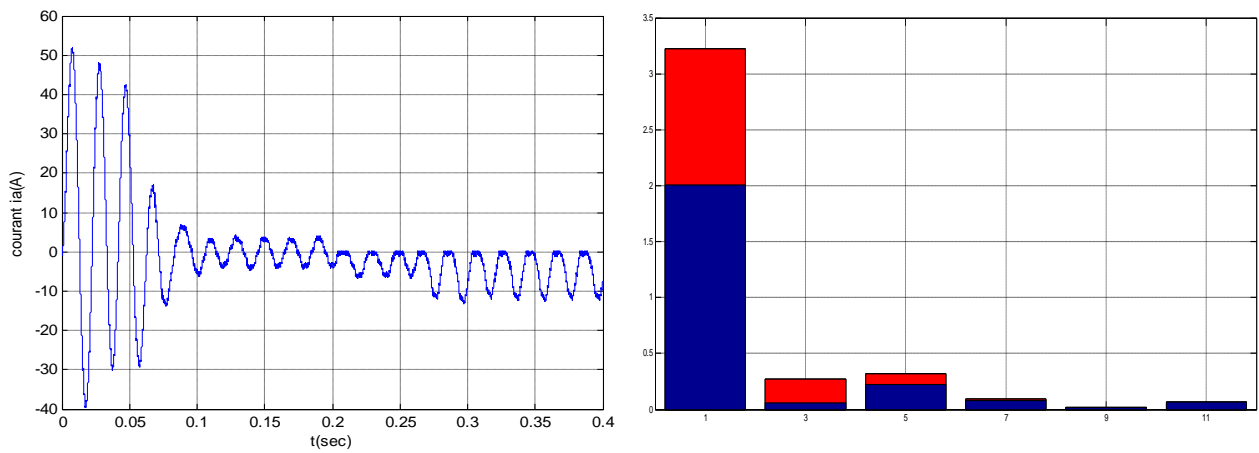
Figure II.25 : (a) : Courant statorique lors d'un court-circuit sur un interrupteur



Court-circuitde T1 et T2 de la phase (a)spectre harmonique

Fig II.26 : (b) : Courant statorique lors d'un défautde court-circuit sur deux interrupteurs

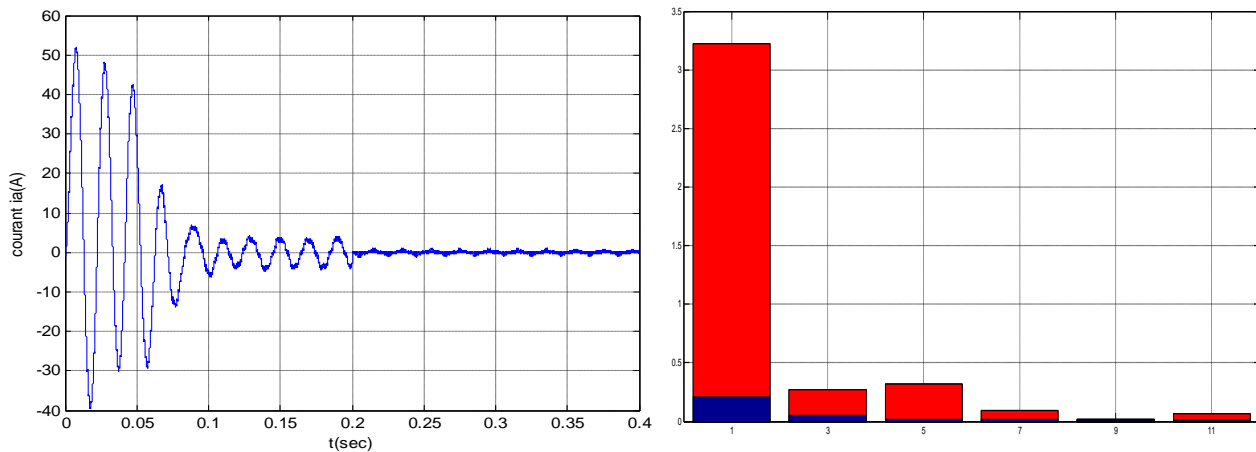
- Circuit ouvert sur un et deux intercepteurs



Circuit ouvertde T1 phase (a)

spectre harmonique

Figure II.27 : (a) : Courant statorique lors d'un défautde circuit ouvert sur un interrupteur



### Circuit ouverte de T1et T2spectre harmonique

**Figure II.28 : (b) : Courant statorique lors d'un défaut de circuit ouvert sur deux interrupteurs**

#### II .7.2 Interprétation des résultats :

L'analyse harmonique du courant statorique montre une apparition de la composante harmonique de 2ème ordre après le défaut. On peut conclure que l'évolution des colonnes des spectres aux fréquences 50HZ a montré qu'il y a un défaut (court-circuit) d'une phase de la MAS. En outre, Les figures (II.25) à (II.28) montrent que la différence entre un fonctionnement normal et celui avec un défaut (court-circuit) d'une phase apparaît sur les amplitudes des spectres de courants statoriques (les raies caractéristiques d'un défaut court-circuit). En effet, l'amplitude de ces composantes augmente en présence de défaut. Dans cette analyse fréquentielle, il est préférable de faire une étude globale sur les courants car un défaut au stator est visible sur le spectre des courants d'alimentation. Mais faire une FFT sur chaque courant risque d'être pénalisant en temps de calcul, et de ne pas bien localiser le défaut de la phase coupée. Pour remédier à ce problème, une technique consiste à étudier l'évolution temporelle des signaux et à représenter les courants statoriques dans un référentiel lié au stator  $\alpha \beta$  montre les signatures de défaut qui sont basées sur une représentation bidimensionnelle des courants statoriques comme présenter dans le chapitre

## **II.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons validé par simulation le fonctionnement du moteur asynchrone en présence de défaut d'onduleur de tension. Nous pouvons constater que les résultats obtenus sont conformes avec ceux prévus théoriquement. Dans cette partie, nous avons présenté la méthode de détection des défauts qui peuvent survenir au niveau du stator de la machine, cette méthode est basée sur la représentation bidimensionnelle des courants statoriques. La deuxième partie de ce chapitre basée sur diagnostic des défauts par analyse des courants statoriques dans le repère de Concordia et par l'analyse despectral en utilisant la FFT.

**CHAPITRE III**  
**Simulation de défauts**  
**statoriques du moteur**  
**asynchrone**

### III.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on étudiera les performances du moteur asynchrone en présence de défauts, en déduisant les courants statoriques, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. On va développer une technique de détection de défauts qui est basée sur la surveillance de la tension et le courant statorique pour plusieurs types de défauts électriques comme sur / sous tension, sur charge, inversion de phase, coupure d'une phase, déséquilibré d'alimentation et défaut de court-circuit monophasé à la terre.

En raison de ces défauts électriques, les enroulements du moteur sont chauffés et qui conduisent un défaut d'isolation et donc de réduire la durée de vie du moteur. Pour analyser le comportement du moteur asynchrone pendant les défauts statoriques, le moteur est simulé dans l'environnement MATLAB / Simulink dans des conditions défectueuses.

### III.2 Moteur asynchrone en présence de défauts de déséquilibre d'alimentation :

#### III.2.1 Déséquilibre du système d'alimentation :

Lorsque les trois tensions d'alimentation ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé. L'analyse en régime permanent du moteur asynchrone qui fait objet d'une source déséquilibrée est assez présente dans la littérature. On y trouve deux méthodes d'évaluation du taux de déséquilibre utilisées pour cette analyse, La méthode utilisant la définition de NEMA, et une autre qui utilise la valeur absolue de la définition vraie. La définition vraie nous permet d'analyser le problème dans un autre contexte par rapport à la définition de NEMA. Bien que cette dernière définition soit la plus utilisée dans l'industrie grâce à sa simplicité de calcul, la définition vraie donne une bonne interprétation physique de la cause du déséquilibre et elle est très utile pour la prédiction et l'analyse de l'effet du déséquilibre sur les moteurs.

Dans notre étude, on utilise la définition de NEMA (National Equipment Manufacturer's Association). Le taux de déséquilibre selon la définition NEMA est donné par :

$$U_{NEMA} \% = \frac{\text{déviation max de la tension par rapport à la tension moyenne de ligne}}{\text{tension moyenne de ligne}} \cdot 100 [19]$$

Elle considère seulement les amplitudes, les phases ne sont pas incluses.



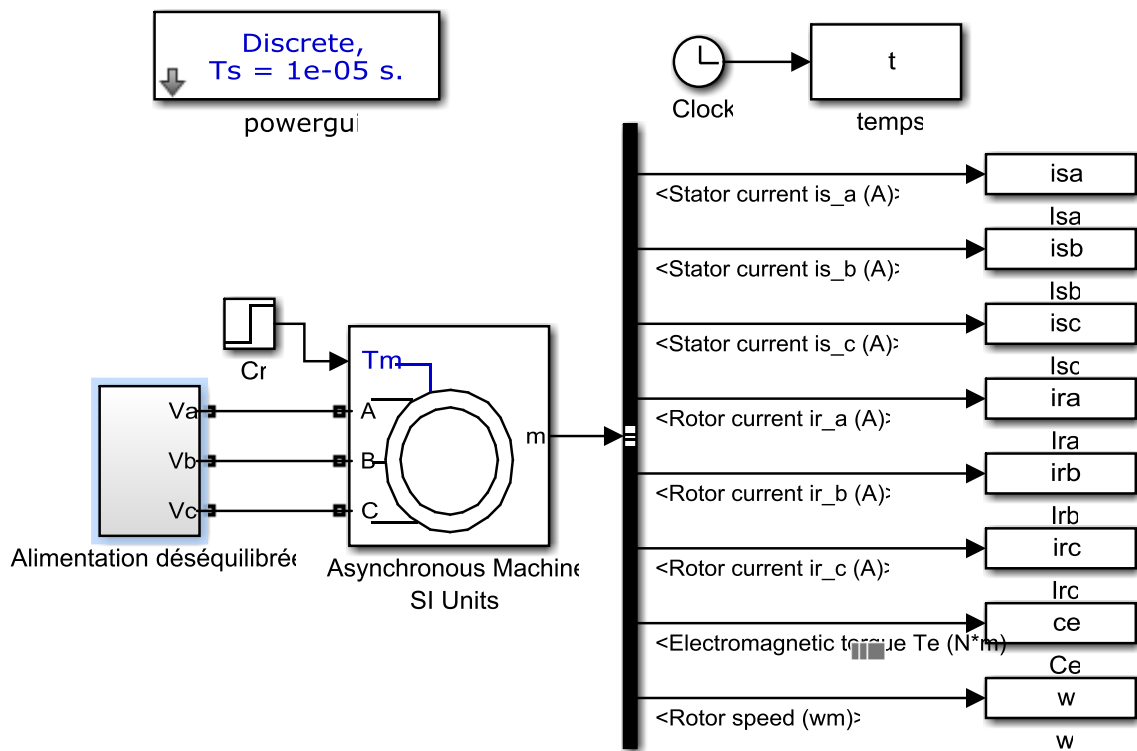
**III.2.2 Sources du déséquilibre :**

Le déséquilibre de tension est principalement dû aux :

- a. Courant de charge déséquilibre : ceci est fréquent pour les récepteurs triphasés basse tension, et pour les réceptrices monophasées hautes tensions comme la machine à souder, des fours à arc et la traction ferroviaire.
- b. Courant équilibre circulant dans des impédances déséquilibrées : comme les impédances des réseaux électriques (inductance et capacité), les enroulements des transformateurs triphasés et des machines tournantes dus à une conception erronée.

**III.2.3 Simulation de défaut de déséquilibre d'alimentation :**

Dans cette étude on présente une étude par simulation sous l'environnement Matlab-Simulink d'un déséquilibre d'alimentation. Le modèle de simulation est présenté sur la Fig (III 1)



**Fig. III.1** Modèle de simulation de déséquilibre d'alimentation

**III.2.4 Résultats de simulation :**

Un défaut de déséquilibre de tension d'alimentation est créé dans la phase A, basé sur l'équation(III-1) ainsi que, les tests de simulation sont obtenues à vide et en pleine charge, comme illustré dans la Fig. III.2 .

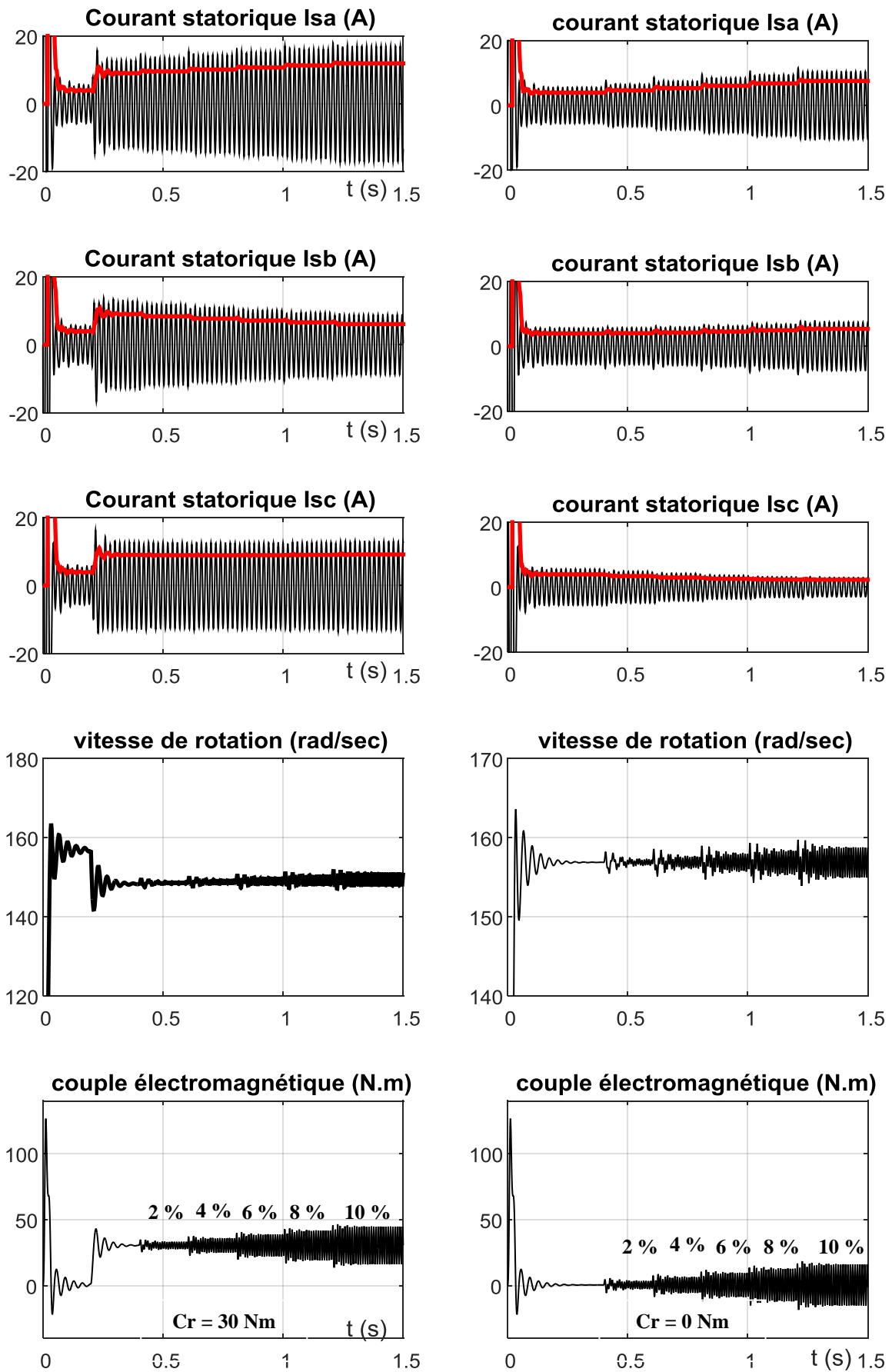


Fig. III.2 Résultats de simulation durant un déséquilibre d'alimentation dans la phase  $I_{sa}$

### III.3 Moteur asynchrone en présence de défaut d'inversion de deux phase d'alimentation :

Le problème d'inversion de deux phase se produit dans le moteur asynchrone lorsque deux phases d'alimentation sont inversées à cause d'une erreur de câblage qui provoque une rotation dans le sens antihoraire (sens inverse de la normale) serait de provoquer un fonctionnement et un problème de sécurité. Généralement lorsque le moteur est utilisé dans des applications industriels importantes comme les ascenseurs ou les pompes immergées où il est important ou dangereux que le moteur fonctionne dans le sens inverse. Un système de protection contre la surchauffe est placé et arrêter le moteur lorsque le sens de rotation du moteur est inversé.[14]

#### III.3.1 Nécessité du contrôle de l'ordre des phases :

L'ordre des phases est important lors du câblage d'un moteur triphasé car il va déterminer le sens de rotation du moteur. Si on alimente un moteur dans le sens direct L1, L2 et L3 respectivement sur U1, V1 et W1, celui-ci tournera dans son sens normal de rotation. Si par contre on alimente ce moteur dans le sens indirect L1, L3 et L2 respectivement sur les mêmes bornes, il tournera en sens inverse.[19]

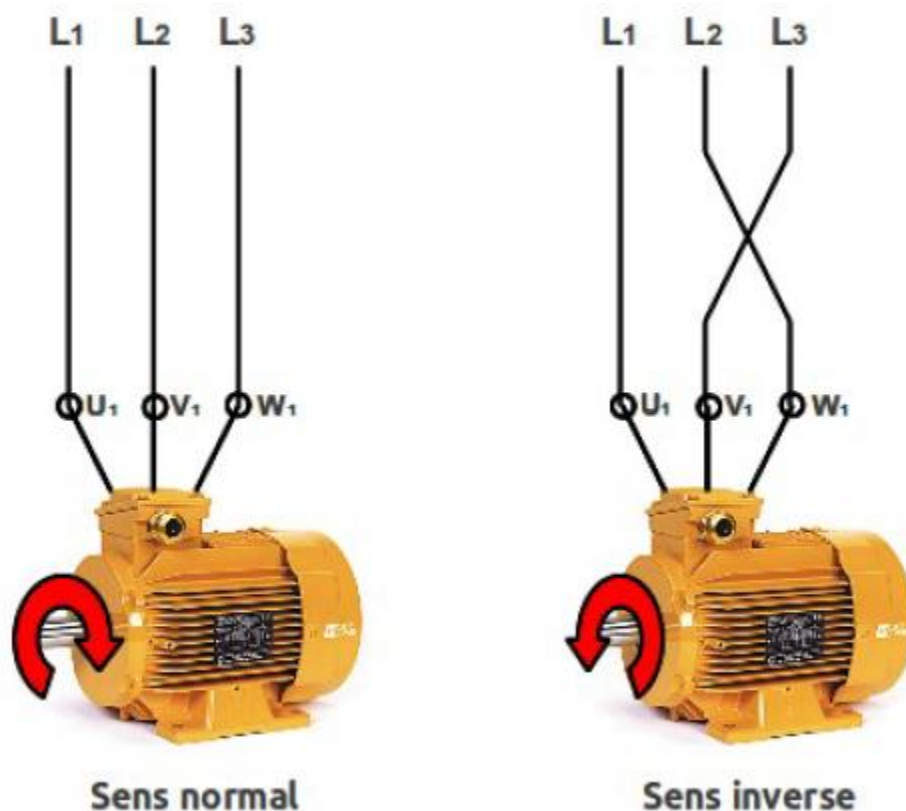


Fig. III.3 Inversement de sens de rotation du moteur asynchrone

Le défaut d'inversion de phase est simulé sous MATLAB/SIMULINK en changeant deux phases quelconques à partir de la séquence normale L1, L2 et L3 à l'instant  $t=0.5$  s. Les résultats de simulation est présentés dans la Fig III-5, on observe que le moteur tourne dans le sens inverse, tout simplement, le moteur tourne à une vitesse négative. Le modèle de simulation est présenté sur la Fig III.4.

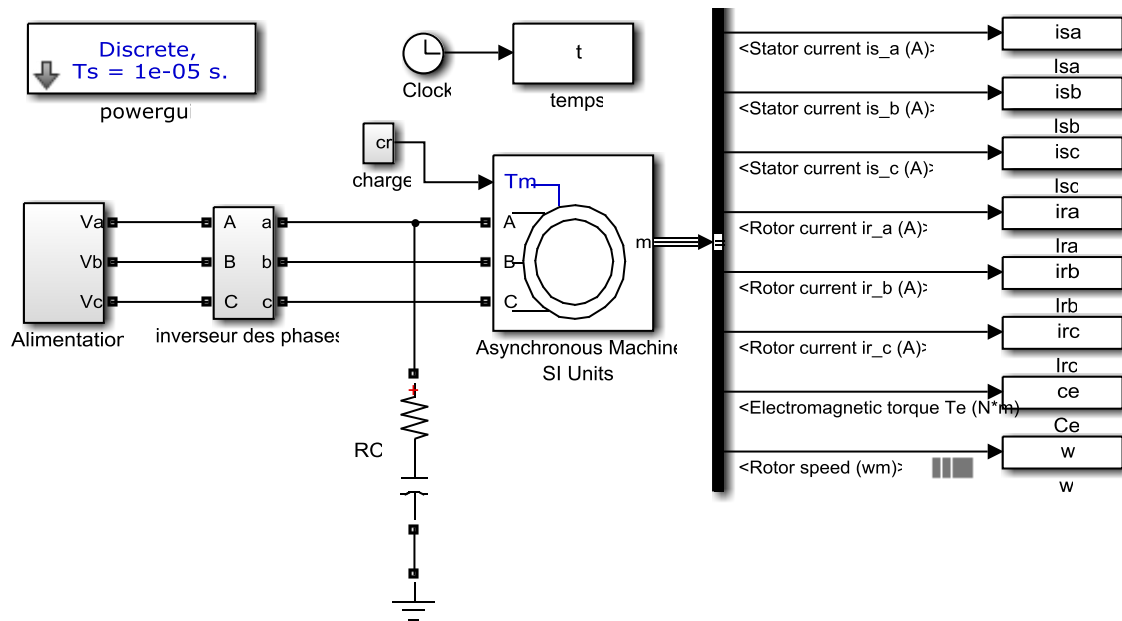


Fig. III.4 Modèle de simulation d'inversement de deux phases d'alimentation asynchrone

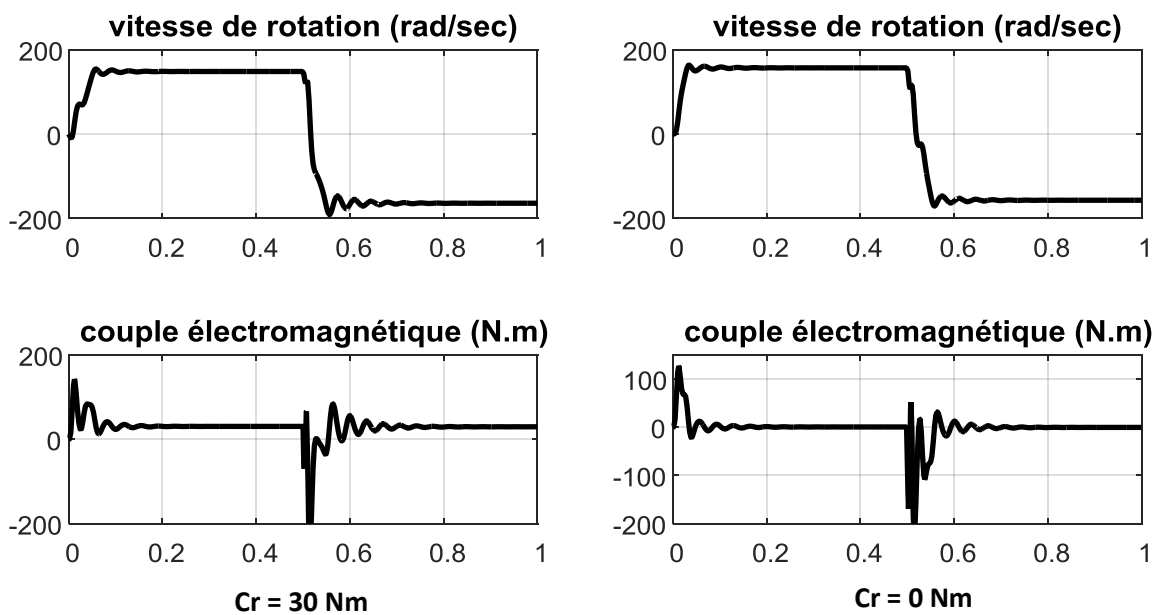


Fig. III.5 Résultats de simulation durant une inversion de deux phases L1 et L2 à  $t=0.5$  s

### III.4 Moteur asynchrone en présence de surintensité (surcharge)

Une surintensité est définie comme un courant entraînant une température  $T_{lim}$  non compatible avec les conducteurs et isolants du moteur, c'est à dire telle que  $T_{lim} > T_{max}$ . On limite les surcharges aux élévations de température « lente » et progressive, c'est à dire inférieure à 3 ou 10 fois le courant nominal pendant quelques secondes.[19]

#### III.4.1 Causes

Une surintensité apparaît quand l'intensité appelée est supérieure à celle supportable par le moteur. Les causes de surintensités sont multiples parmi celles-ci on peut citer :

- surcharge mécanique de la machine entraînée (augmentation du couple résistant),
- surcharge mécanique du moteur lui-même (roulements à billes défectueux par exemple)
- démarrage trop long (inertie importante de l'ensemble entraîné),
- démarrage trop fréquent (pianotage),
- marche en monophasée (coupure d'une phase suite à la fusion d'un fusible),
- baisse de tension,
- blocage au démarrage,
- court-circuit.

Le défaut de surcharge est créé en augmentant le couple de charge du moteur, en changeant le couple résistant  $C_r$  dans le schéma de simulation. Les courants statoriques, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique au cours de différentes situations sont présentés dans la Fig III-6. D'après les résultats de simulation dans les conditions de défaut de surcharge, on constate que l'augmentation des courants de phase, la surchauffe de la machine et la vitesse du moteur tend vers zéro lorsque le couple résistant dépasse 90 Nm.[19]

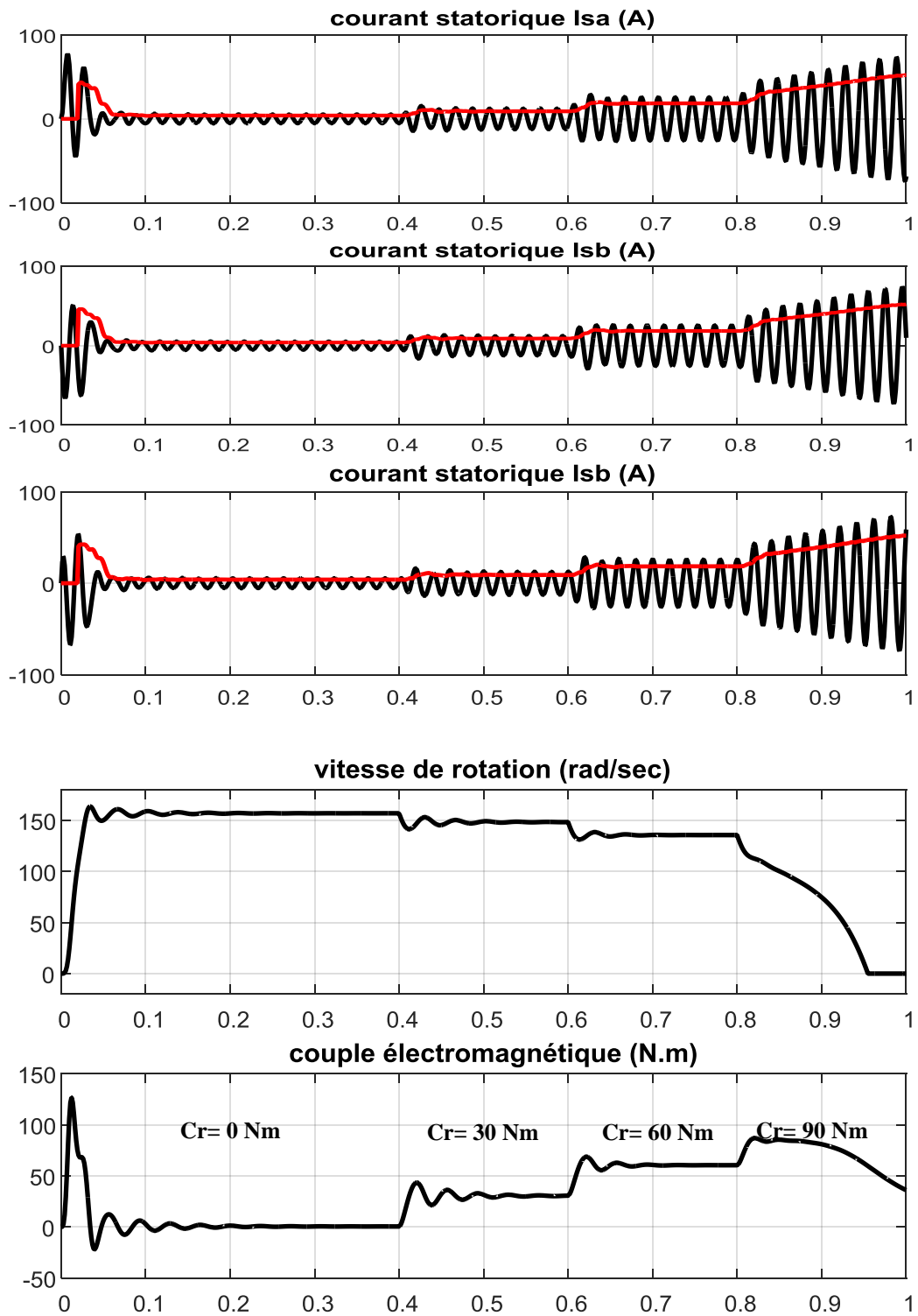


Fig. III.6 Résultats de simulation au cours de différentes surcharge du moteur

III.5 Défaut de coupure d'une phase d'alimentation

Pour un bon fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé, il doit être câblé à un système triphasé équilibré avec une tension d'alimentation nominale. Une fois que ces l'une des trois phases sont déconnectées, le courant dans cette phase tend vers zéro qui provoque un surcharge.

Les causes de ce défaut sont multiples parmi celles-ci on peut citer :

- 1) Un des trois fusibles de protection contre le court-circuit tombé en panne.
- 2) Une phase d'alimentation du moteur est en circuit ouvert (coupure d'une phase).
- 3) Un mauvais réglage des dispositifs de protection prévus pour le moteur.
- 4) Un contact de puissance de contacteurs est endommagé due à l'oxydation.

Le défaut de coupure d'une phase est simulé avec l'une des trois phases d'alimentation est maintenue à zéro à l'instant  $t=0.2$  s, les résultats de simulation de la Fig III-8 sont obtenues pour différentes conditions de charge. D'après ces résultats de simulation, on constate qu'au cours de fonctionnement du moteur avec deux phases, le courant circule dans les deux phases est plus grand et une température plus élevée sera générée dans l'enroulement statorique qui provoque un surcharge sur le moteur. Le modèle de simulation de ce défaut est donné par la Fig III-7

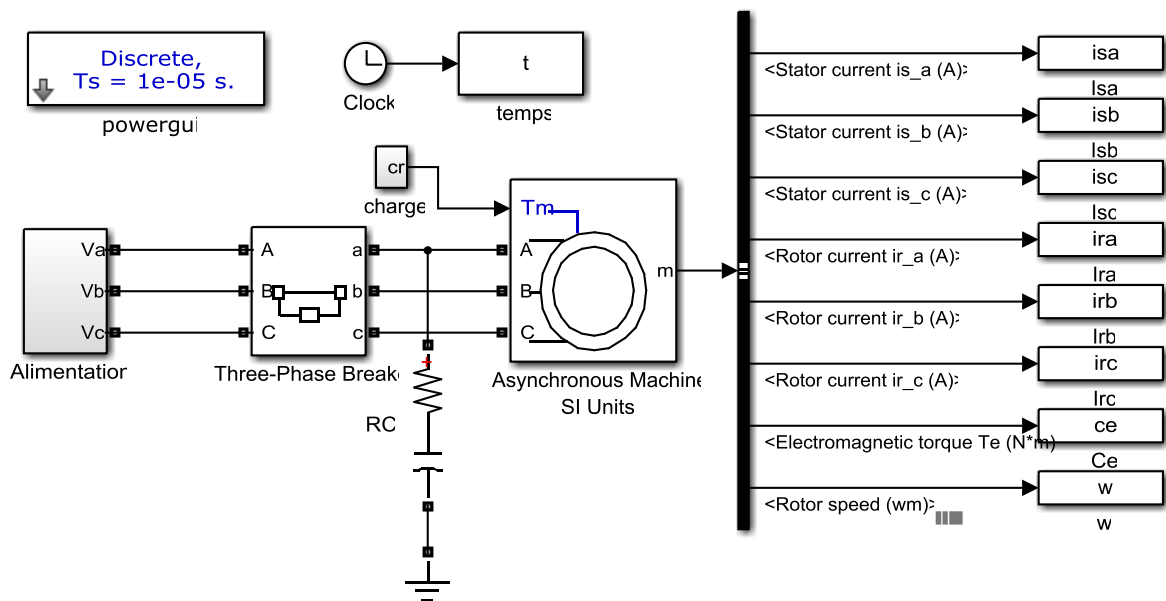


Fig. III.7 Modèle de simulation de coupure d'une phase d'alimentation

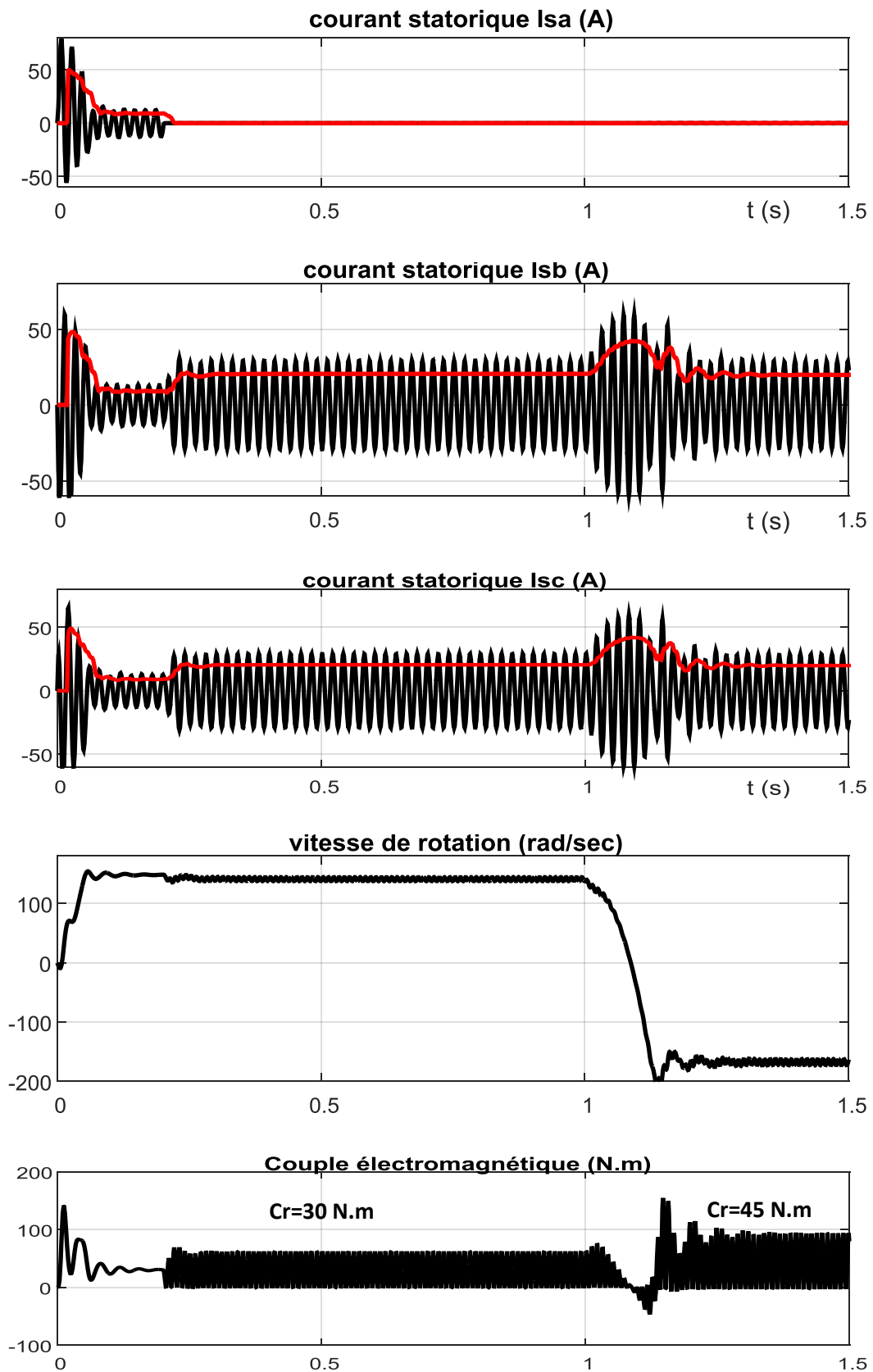


Fig. III.8 Résultats de simulation durant le défaut de coupure de la phase A à  $t=0.2$ s



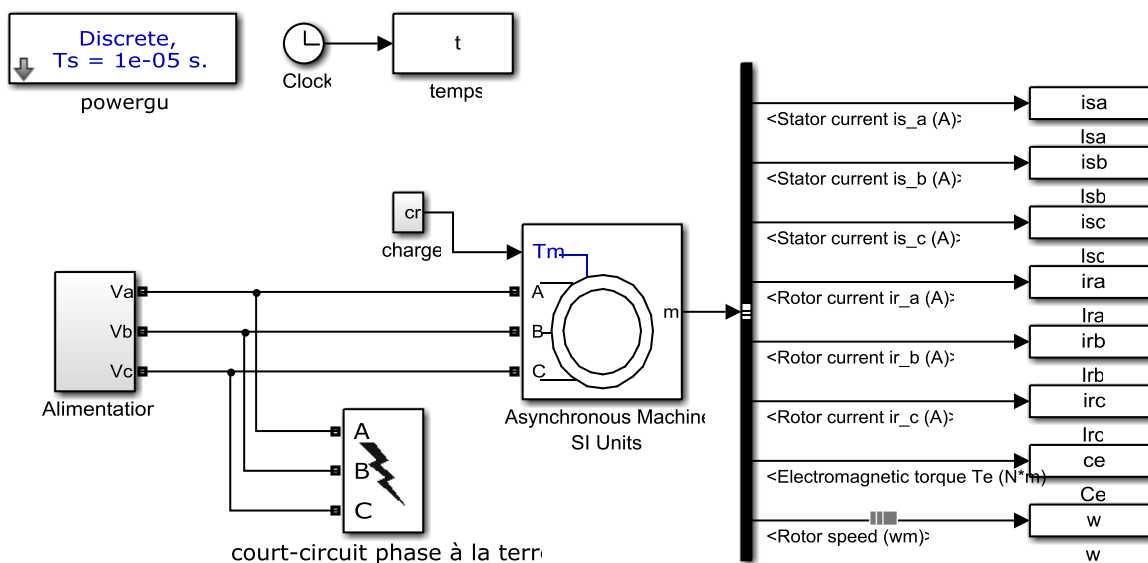
**III.6 Défaut de court-circuit monophasé à la terre :**

Un défaut à la terre est un court-circuit entre un ou plusieurs conducteurs et la terre ou un élément conducteur mis à la terre. Il engendre un courant circulant des conducteurs en défaut vers la terre, dit courant homopolaire. Il peut être monophasé, biphasé (double défaut à la terre), ou triphasé à la terre. Le courant de défaut à la terre est caractérisé par sa composante homopolaire mais contient aussi une composante directe et inverse. Il peut aussi être la conséquence d'arc électrique.

Le défaut de court-circuit à la terre est simulé comme indiqué dans la Fig III-9. Pendant un état de fonctionnement normal, et à  $t=0.8$  s, on applique un court-circuit monophasé à la terre.

D'après les résultats de simulation, on constate que les pulsations de couple sont élevées, le moteur peut être fonctionné avec une charge réduite en fonction de l'exigence de l'application.

En outre, le courant statorique durant l'application de défaut est supérieur au courant de démarrage. Par conséquent, cet aspect doit être pris en considération dans la conception du système d'entraînement.[19]



**Fig. III.9** Modèle de simulation de défaut de court-circuit phase à la terre

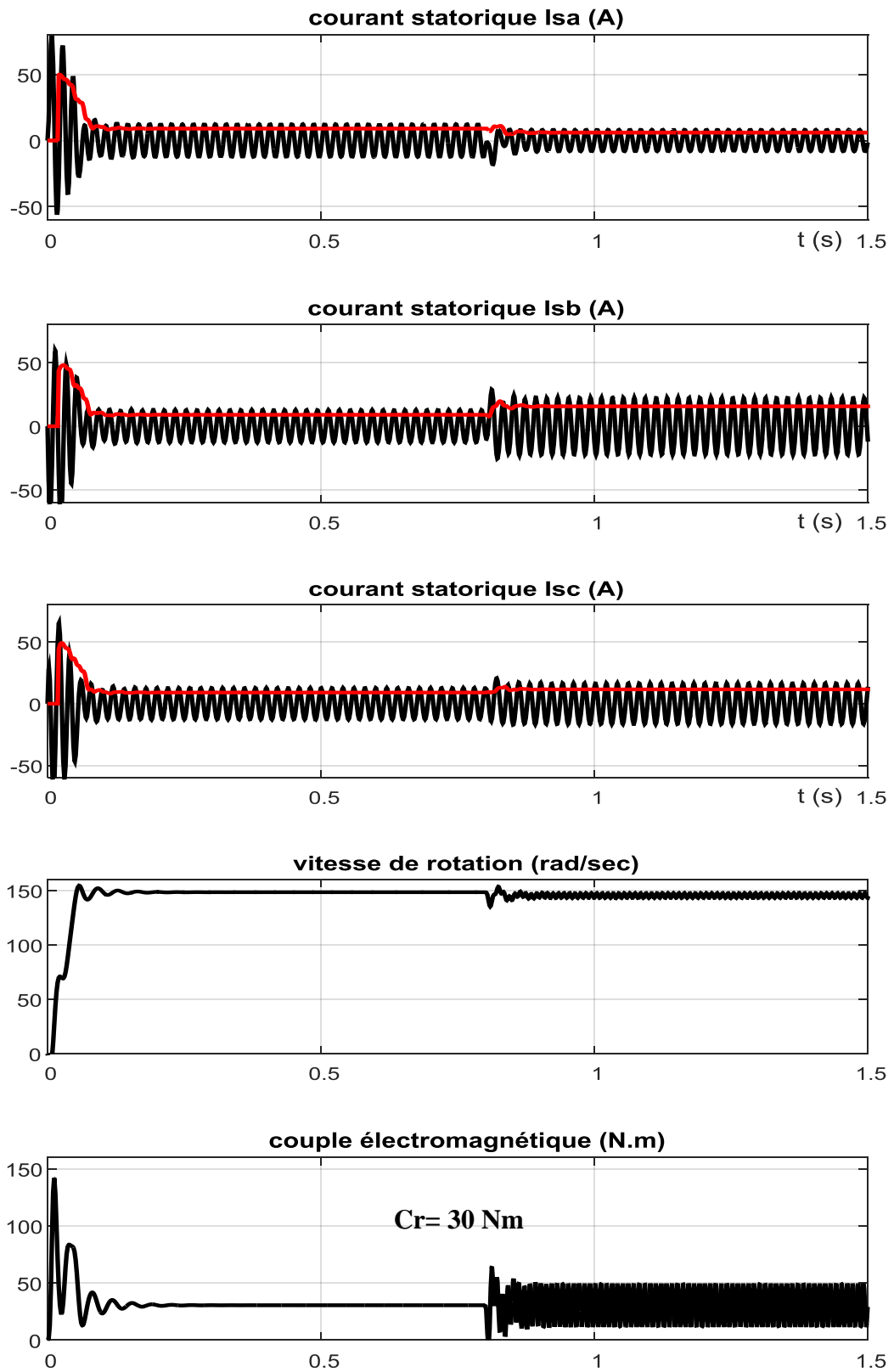


Fig. III.10 Résultats de simulation durant le court-circuit de la phase A à la terre à  $t=0.2$ s

**III.7 Défaut de sous/surtension d'alimentation :****Défaut de sous-tension**

Si un moteur asynchrone fonctionne en pleine charge est soumise à une sous-tension, la vitesse de rotation et le rendement du moteur sont diminuent, le facteur de puissance, le courant de charge et la température sont augmentera.

Le défaut de sous tension est simulé par la réduction de la tension maximale sur les trois phases d'un certain pourcentage lorsque le moteur fonctionne dans des conditions normales. La fig III-11 (a) montre les caractéristiques de performance au cours de l'état de sous-tension à pleine charge.

**Défaut de surtension**

Lorsque le moteur fonctionne en état normal en pleine charge, l'augmentation de la valeur maximale des tensions d'alimentation sur les trois phases d'un certain pourcentage provoque un défaut de surtension. La Fig III-11 (b) montre les caractéristiques de performance pendant le fonctionnement de surtension à pleine charge. Due à l'augmentation des tensions de phase, le courant de ligne augmente de la valeur nominale.

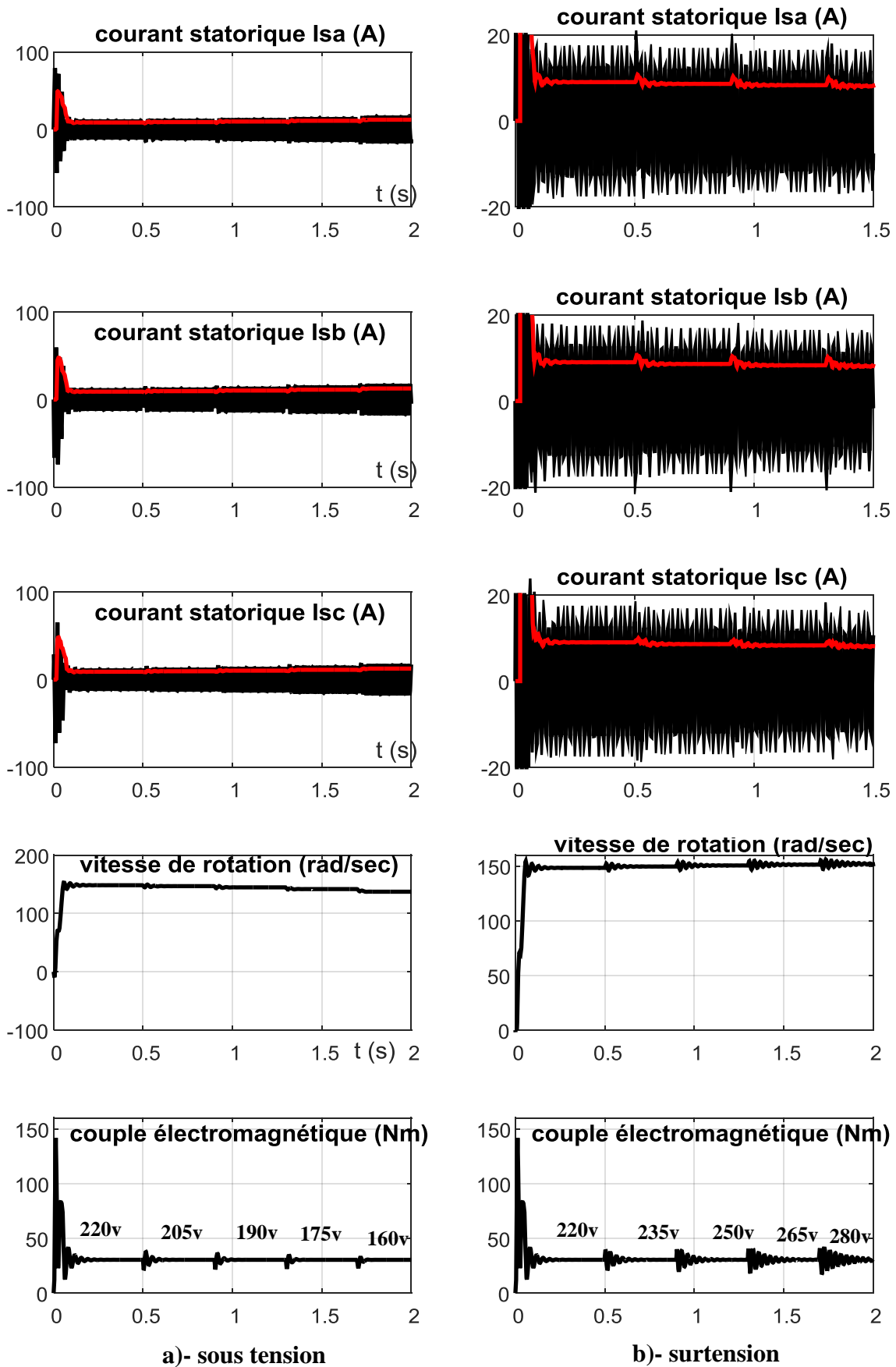


Fig. III.11 Résultats de simulation durant le défaut sous/surtension

III-8 Système de détection et de protection :

Le schéma fonctionnel général du système de protection du moteur est représenté sur la Fig.III-12. Le système ne nécessite pas de capteurs spéciaux. Seulement des transformateurs de courant (TC) et de tension (TP) sont utilisés pour captés les courants de ligne et les tensions de phases. Les données captées à partir du transformateur de courant et de tension sont transférés au relais de protection, puis commandé l'ouverture de contacteur de ligne du moteur en cas de défaut.

L'algorithme utilisé pour la détection de défaut est donné comme suit :

- 1- Si le déphasage entre la phase (a) et (b) égale à  $240^\circ$  (inversion de deux phases) ,générer un signal de déclenchement et arrêter le moteur.
- 2- Si  $(V_a | V_b | V_c = 0)$  (coupure d'une phase), générer le signal de déclenchement pour arrêter le moteur.
- 3- Si (le taux de déséquilibre de tension  $> 5\%$ ), générer le signal de déclenchement et arrêter le moteur.
- 4- Si (le taux de déséquilibre du courant  $> 40\%$ ), arrêter le moteur.
- 5- Si  $(I_a | I_b | I_c) > 10A$  (surintensité) générer le signal de déclenchement et arrêter le moteur.
- 6- Si  $(I_a + I_b + I_c) > 1 A$  (défaut de court-circuit phase à la terre) , générer un signal de déclenchement et arrêter le moteur[19]

Le schéma d'implémentation du système de détection et de protection est représenté dans la Fig III-12

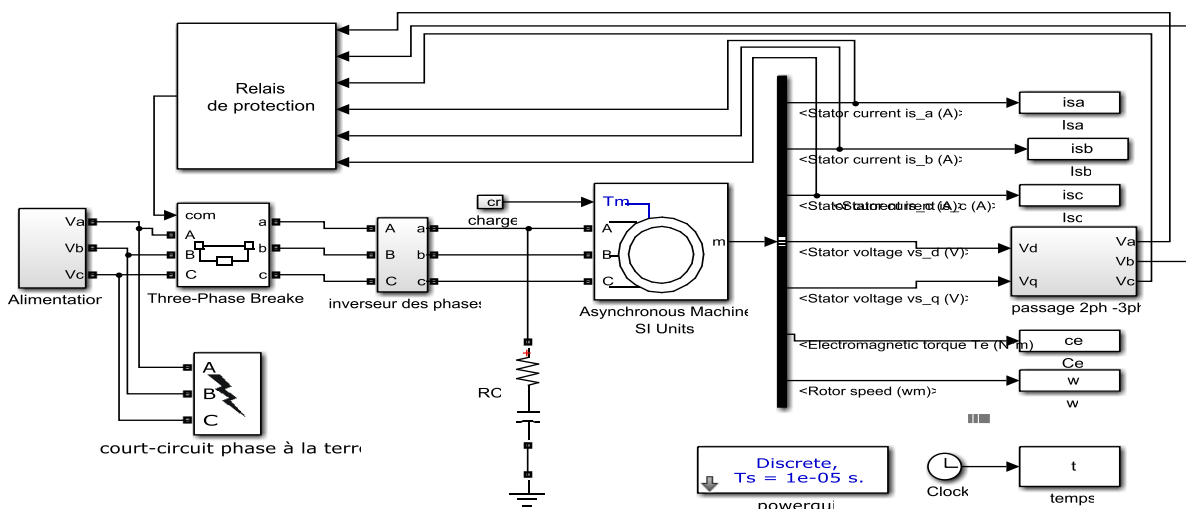


Fig (III-12) : Modèle de simulation de système de détection et de protection

**III.9 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons étudié les performances du moteur asynchrone triphasé pendant les défauts statorique en utilisant MATLAB/SIMULINK. Cette étude nécessite l'implémentation de différents relais de protection et de détection de défauts.

# Conclusion générale

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une défaillance, même la plus faible, peut mener à un dommage matériel. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les MAS triphasées. Nous avons focalisé notre étude sur les MAS à cage : d'une part, ce sont les plus utilisées actuellement, à raison de leur simplicité de construction, leur faible coût d'achat et de fabrication, leur robustesse mécanique ou encore leur quasi-absence d'entretien et leur fonctionnement à vitesse variable grâce à l'avancée de l'électronique de puissance; à tel point que nous les trouvons maintenant dans tous les domaines industriels.

Pour cela, n'oublions pas que l'arrêt non programmé ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter et elles peuvent perdre leurs noms dans un marché concurrentiel, ce qui influe directement sur leurs milieux économiques, et déclarer enfin leur faillite.

Dans cette étude, nous avons fait, pour détecter les défauts statoriques, une simulation des autres signaux de la machine (le couple, la vitesse, et les courants statoriques). Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (MAS sain) et anormal (MAS défaillante), nous avons simulé des modèles de la MAS face à des défauts statoriques. Ensuite, nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts statoriques.

Enfin, nous n'avons présenté un système de détection et de protection des différents défauts: défaut de déséquilibre de tension d'alimentation, défaut de sous/surtension, défaut de surcharge, défaut de coupure d'une phase, défaut d'inversion de deux phases et défaut de court-circuit phase à la terre.

En perspective, il nous semble important :

- De diminuer le nombre des hypothèses simplificatrices
- D'étudier d'autres méthodes de diagnostic basé sur l'intelligence artificielle.
- Prise en compte de modèle de la MAS dédié au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spire.



## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Abla Bouguerne, Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones CONSTANTINE 2009
- [2] L. Baghli 'Modélisation Et Commande Des Machines Asynchrone', Cours de commande IUFM De Lorraine UHP 2005.
- [3] J. P Caron, J P Hautier, 'Modélisation Et Commande De La Machine Asynchrone', Edition Technip, Paris 1995.
- [4] : BELBECHE Adel « Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase », Diplôme Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna 2013.
- [5] : BENBRAHIM Amel « Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » thèse Magistère Université de BATNA 2009
- [6] : KHOV Makara « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents », Thèse Doctorat De L'université De Toulouse 2009.
- [7] : CHEMMOURI Boudjemaa « Commande Non-Lineaire D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents », Diplôme D'ingénieur D'etat En Genie Electrotechnique Université Mohamed Boudiaf De M'sila 2005.
- [8] : BELBECHE Adel « Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase », Diplôme Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna 2013
- [9] KAROUI Abdelmounaim BRAHIMI Ammar Détection De Défaut Statorique Pa Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents Ouargla 2014 .
- [10] : SHASHANK Gupta, ANURAG Tripathi « Total Harmonic Distortion Analysis During Inverter Fault In Permanent Magnet Synchronous Motor Using Matlab & Simulink », Article IEEE 2013
- [11] : BESSOUS Noureddine « Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones » Diplôme magister Université Mentouri de Constantine 2007
- [12] : BENBRAHIM Amel « Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » thèse Magistère Université de BATNA 2009 .
- [13] N. Amar 'Conception d'Observateurs Robustes pour le Diagnostic des Processus Energétiques' thèse de magistère 2009, université de Annaba
- [14] O. Ondel 'diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone' thèse de Doctorat 2006.

- [15] F. Barrêt ‘Régime Transitoire Des Machines Tournantes Electriques’, Collection DesEtudes De Recherches Edition Eyrolles, Paris 1982.
- [16] B. OUAHID’ contribution à l’analyse des onduleurs multi niveaux fonctionnementsymétrique et asymétrique’ mémoire de magistère 2005.
- [17] J. Ragot ‘Diagnostic des systèmes linéaires’ collection pédagogique d’automatique.
- [18] P. Sylvain ‘intelligence artificielle et diagnostic’ université de Valenciennes (UMRCNRS 8530).
- [19] M Sudha and P.A nbalagnDepatment of Electrical and Electronics Engineering Kumaragurecollge of Technology combatoreTamilnadu India KaligharKarnnaitli college of engineering and technology coinbator India

---

## ANNEX A

### PATAMETRES DU MOTEUR UTILISE

Puissance	4KW (5.4 HP)
Nombre de pair de pôle	2
Friction facteur	0.002985 F (N.m.s)
Voltage	400V
Longueur de la machine	0.12 m
Moment d'inertie	0.0131 Kg.m <sup>2</sup>
Résistance d'une phase rotorique	1.395 $\Omega$
Résistance d'une phase statorique	1.405 $\Omega$
Inductance de fuite d'une phase statorique	0.005839 H
Résistance d'une barre rotorique	$1.93 \times 10^{-4} \Omega$
Inductance de fuite d'une barre rotorique	

## Résumé :

Ce travail s'inscrit dans la surveillance et diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écurie en présence des défauts de types:

- Court circuit d'un ou de deux composants d'un même bras d'onduleur de tension.
- Circuit ouverte d'un ou de deux composants d'un même bras d'onduleur de tension.
- Déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation.
- Coupure d'une phase statorique.
- Sous/surtension,
- Surcharge,
- Inversion de deux phases
- Court-circuit phase à la terre.

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de deux techniques de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts: l'une se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et la seconde sur l'analyse bidimensionnelle du vecteur de Park qui offre une analyse très fine des signaux bidimensionnels.

**Mots clés :** diagnostic, défauts, machine asynchrone, Surcharge, FFT, analyse bidimensionnelle.

## ملخص:

يندرج هذا العمل في رصد و تشخيص الأعطاب الناتجة في الآلات اللامتزامنة ذات القفص السنجابي عند الإعطاب التالية:

- 1 - دارة قصيرة لعنصر أو عنصرين من نفس العمود للموج.
- 2 - دارة مفتوحة لعنصر أو عنصرين من نفس العمود للموج
- 3 - اختلال في طور من أطوار التغذية
- 4 - قطع لطور
- 5 - زيادة أو نقصان في التوتر
- 6 - الزيادة في الحمولة
- 7 - انقلاب لطورين من أطوار التغذية
- 8 - دارة قصيرة بين طور والأرضي.

يستند موضوع تشخيص الإعطاب على طريقتين لمعالجة الإشارة، وهما يعتبران حلان ناجعان في التشخيص: الطريقة الأولى هي التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت FFT. والثانية تعتمد على التحليل ذو البعدين لبارك حيث لديها تحليل دقيق جدا تستخدم لاستخراج المعلومات اللازمة من تيار الجزء الثابت للمحرك

**الكلمات المفتاحية:** تشخيص، أعطاب، الآلات اللامتزامنة، الزيادة في الحمولة، FFT، التحليل ذو البعدين.