

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du Diplôme de Master Académique

Par:

BOUSSAG ESSADIQ

BOUAZIZ SAID

Intitulé

**DETECTION DE DEFAUTS DE COURT-CRUIT  
ENTRES SPIRES STATORIQUES D'UNE MACHINE  
SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS (MSAP).**

Devant le jury:

Dr.Y.LAAMARI

Encadreur/rapporteur

Mr.BENDAIKHA. A/MALIK

Président

Mr.LADGHEM.CHIKOCHE

Examineur

Mr.A.CHOUCHOU

Examineur

Année universitaire : 2018 / 2019

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions Dieu (Allah) pour la bonne santé et la bonne volonté qu'il nous a données au cours de nos études. Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Mr. LAAMARI YAHIA, de nous avoir proposé ce thème d'une part, et pour ses conseils constants, sa sagesse et ses suggestions et savoir-faire qui ont contribué et facilité la réalisation de ce présent mémoire. Nous remercions également les membres du jury d'avoir libéré leur temps, leurs compétences et leur expériences afin de juger et d'évaluer cet humble travail.*

*Nous n'oublions pas d'adresser nos remerciements les plus chaleureux à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*

*BOUAZIZ et BOUSSAG*

*Promotion ELM 2018*

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail.

A tous mes proche et personne qui ont fait que je sois la devant vous , à chaque acte donnée pas tout personne noble de geste et beaux d`esprit qui ont fait que je suis la présent devant vous qui sont les plus proche ,les parent , personne de la famille jusqu`à celle que on a rencontré ou moins que une fois dans sa vie car chaque acte petit ou grand a son impact sur nous , c`est pour tout ce qui ont été

la dans ma vie .

**BOUAZIZ**

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail.

A ma Mère

A mon Père

A mes frères et mes sœurs.

A tout ma famille.

A tous mes amis chacun à son nom.

**BOUSSAG**

# *Sommaire*

# *Sommaire*

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b><u>Chapitre I</u> : Etat de l'art : Diagnostic des défaillances dans les MSAP</b>	
<b>I.1</b> Introduction .....	<b>4</b>
<b>I.2</b> Constitution de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) .....	<b>4</b>
<b>I.2.1</b> Stator .....	<b>5</b>
<b>I.2.2</b> Rotor.....	<b>5</b>
<b>I.3</b> Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) .....	<b>6</b>
<b>I.4</b> Différent types de MSAP.....	<b>7</b>
<b>I.5</b> Les champs d'applications de la MSAP.....	<b>9</b>
<b>I.6</b> Avantages et inconvénients des MSAP .....	<b>9</b>
<b>I.7</b> Défaillances dans les machines électriques(MSAP) .....	<b>10</b>
<b>I.7.1</b> Défaillances statoriques .....	<b>10</b>
<b>I.7.1.1</b> Les défauts de bobinage statoriques .....	<b>11</b>
<b>I.7.1.2</b> Court-circuit dans une phase .....	<b>12</b>
<b>I.7.1.3</b> Circuit ouvert sur une phase .....	<b>13</b>
<b>I.7.1.4</b> Défauts de roulement .....	<b>13</b>
<b>I.7.2</b> Défaillances rotoriques .....	<b>14</b>
<b>I.7.2.1</b> Excentricité statique et dynamique.....	<b>14</b>
<b>I.7.2.2</b> Les défauts des aimants (Désaimantation) .....	<b>16</b>
<b>I.8</b> Surveillance et diagnostic des défauts de la MSAP .....	<b>16</b>
<b>I.8.1</b> Approche signal .....	<b>17</b>
<b>I.8.2</b> Approche modèle.....	<b>18</b>
<b>I.9</b> Surveillance et diagnostic des défauts de court-circuit statoriques dans les MSAP.....	<b>19</b>
<b>I.10</b> Importance de la surveillance des MSAP.....	<b>20</b>
<b>I.11</b> Conclusion.....	<b>21</b>

## **Chapitre II : Modélisation de la MSAP en présence de défaut de court-circuit entre spires.**

<b>II.1</b>	Introduction.....	<b>23</b>
<b>II.2</b>	Modélisation des défauts de court-circuit statoriques dans les MSAP .....	<b>24</b>
<b>II.2.1</b>	Modèle de la MSAP à l'état sain .....	24
<b>II.2.2</b>	Modèle de la MSAP en présence de défaut de court-circuit entre spire.....	28
<b>II.2.2.1</b>	Modèle de la MSAP en présence d'un défaut entre-spires dans le repère (abc) .....	29
<b>II.2.2.2</b>	Modèle de la MSAP en présence d'un défaut entre-spires dans le repère ( $\alpha, \beta$ ) .....	32
<b>II.2.2.3</b>	Mise sous forme d'état .....	34
<b>II.3</b>	Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension .....	<b>35</b>
<b>II.3.1</b>	Modélisations du redresseur et du filtre associés à l'onduleur.....	35
<b>II.3.1.1</b>	Modélisation du redresseur triphasé .....	36
<b>II.3.1.2</b>	Modélisation du filtre de tension redressée.....	37
<b>II.3.2</b>	Modélisation de l'onduleur de tension.....	38
<b>II.3.3</b>	Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle) .....	40
<b>II.4</b>	Résultat de la discussion .....	<b>40</b>
<b>II.4.1</b>	Alimentation par le réseau son défaut (la MSAP saine).....	40
<b>II.4.2</b>	Alimentation par un onduleur de tension (la MSAP saine).....	42
<b>II.4.3</b>	Résultats de simulation de la MSAP avec défaut .....	44
<b>II.4.3.1</b>	Influence du changement de la résistance de défaut $r_f$ sur la machine.....	44
<b>II.4.3.2</b>	Influence de la gravité du défaut $\mu$ sur la conduite de la machine.....	46
<b>II.5</b>	Conclusion .....	<b>48</b>

## **Chapitre III : Détection de défaut de court-circuit entre spires par analyse spectrale (FFT).**

<b>III.1</b>	Introduction.....	<b>50</b>
<b>III.2</b>	Différentes méthodes de diagnostic basées sur le traitement du signal .....	<b>50</b>
<b>III.2.1</b>	Analyse spectrale .....	51
<b>III.2.1.1</b>	Rappels sur la transformée de Fourier .....	51
<b>III.2.1.2</b>	La transformé de Fourier rapide (FFT).....	52

<b>III.2.1.3</b> La transformation de Fourier à court terme (STFT) .....	53
<b>III.2.2</b> Analyse cepstrale .....	53
<b>III.2.3</b> Analyse temps-échelle .....	53
<b>III.3</b> Analyse spectrale du courant statorique par FFT.....	54
<b>III.3.1</b> Résultats de simulation.....	54
<b>III.3.2</b> Cas d'un moteur à l'état sain .....	56
<b>III.3.3</b> Cas d'un moteur avec défaut de court-circuit entres spires.....	57
<b>III.3.3.1</b> Analyse spectrale du couple électromagnétique (Machine avec défaut) .....	60
<b>III.3.3.2</b> Analyse spectrale de la vitesse (Machine avec défaut) .....	62
<b>III.4</b> Conclusion.....	65
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	67
<b>Bibliographique</b> .....	68
<b>Annexe A</b> .....	72

# **Symboles et Notations**

# Symboles

---

$V_s$	tension de phase
$i_s$	Courant de phase
$R_s$	Résistance de phase statorique
$L_s$	Inductance de phase statorique
$N_s$	Nombre de spires dans une bobine statorique
$[V_s]$	Vecteurs des tensions de phases
$[i_s]$	Vecteurs des courants de phases
$[R_s]$	Matrice de résistance
$[L_{ss}]$	Matrice d'inductance statorique
$[E_s]$	Vecteur des fém. de phases
$C_{em}$	Couple Electromagnétique
$\Omega$	Vitesse mécanique
$J$	Moment d'inertie du rotor
$C_r$	Couple de charge
$P$	Nombre de Paires de pôles
$\theta$	Angle électrique de la position du rotor
$P$	Nombre de spires de pôles

---

<b>M</b>	Inductance mutuelle entre phase
<b><math>r_f</math></b>	Résistance fictive connectée en parallèle avec la partie court-circuitée
<b><math>V_{as1}</math></b>	Tension aux bornes de la bobine saine $as1$
<b><math>V_{as2}</math></b>	Tension aux bornes de la bobine court-circuitée $as2$
<b><math>i_f</math></b>	Courant de défaut
<b><math>\mu</math></b>	Rapport entre nombre de spires saines et en défaut
<b><math>f_s</math></b>	fréquence du réseau
<b>Sabc</b>	L'interrupteur du bras a, b ou c d'onduleur (deux niveaux).
<b><math>\varphi_{sf}</math></b>	Flux d'ainant permanent.
<b>V red</b>	La tension redressée
<b>(<math>\alpha, \beta, 0</math>)</b>	Trois composants du vecteur de Concordia dans le repère fixe lié au stator
<b><math>V_a, V_b, V_c</math></b>	Tensions de phases statoriques.
<b>D1, D2, D3</b>	Les diodes
<b><math>I_a, I_b, I_c</math></b>	Courants de phases statoriques
<b><math>M_{a2b}</math></b>	L'inductance mutuelle entre la sous-bobine $as2$ et les bobines $bs$ .
<b><math>M_{a2c}</math></b>	L'inductance mutuelle entre la sous-bobine $as2$ et les bobines $cs$ .
<b><math>R_{a1}</math></b>	La résistance de la sous-bobine saine $as1$ .
<b><math>M_{a1a2}</math></b>	L'inductance mutuelle entre la sous-bobine $as2$ et les bobines $as1$ .

---

---

**E(t)** La tension d'entrée (filtre).

**[T]** La matrice de transformation de clark

**[A]** Matrice fondamentale qui caractérise le système.

**[B]** Matrice d'entrée

**[U]** Vecteur de commande

**[X]** Vecteur d'état.

**Ra2** La résistance de la sous-bobine en défaut

**La2** L'inductance de la sous-bobine en défaut

---

## Notations

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents

Fém : Force électromotrice

Nd-Fe-B: Neodym – Fer – Bore

FFT : Transformation de Fourier rapide

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

## Listes des Figures

### Chapitre I :

<b>Figure I.1 :</b> Représentation de la machine synchrone à aimants permanents .....	5
<b>Figure I.2 :</b> Formes simplifiées de la machine synchrone selon le type du rotor .....	6
<b>Figure I.3 :</b> Représentation du moteur à aimants permanents (MSAP) .....	7
<b>Figure I.4 :</b> Différents types de fixation des aimants permanents.....	8
<b>Figure I.5 :</b> Niveaux énergétiques des différents aimants.....	8
<b>Figure I.6 :</b> Différents défauts statoriques.....	11
<b>Figure I.7 :</b> Les courts-circuits dans les enroulements statoriques .....	12
<b>Figure I.8 :</b> Vue éclatée d'un roulement à billes .....	13
<b>Figure I.9 :</b> Différents types d'excentricités .....	15
<b>Figure I.10 :</b> Différentes méthodes de diagnostic dans les machines électriques.....	17
<b>Figure I.11:</b> Principe général de diagnostic par approche modèle.....	19
<b>Figure I.12 :</b> Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques.....	20

### Chapitre II :

<b>Figure II.1 :</b> Schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d'une MSAP .....	25
<b>Figure II.2 :</b> Schéma bloc du modèle électrique de la machine synchrone à aimants saine ...	27
<b>Figure II.3 :</b> Représentation schématique d'un défaut d'isolation entre spires sur une phase de stator (as) .....	28
<b>Figure II.4 :</b> Schéma équivalente de la machine à aimants avec défaut entre-spires dans la phase (as) .....	29
<b>Figure II.5 :</b> Schéma bloc du modèle de la machine en régime dynamique.....	35
<b>Figure II.6 :</b> Schéma de configuration de l'association Redresseur triphasé-filtre .....	35
<b>Figure II.7 :</b> Redresseur à diodes .....	36
<b>Figure II.8 :</b> Tensions de phases( $V_{abc}$ ) et la tension redressée $U_d$ .....	37

<b>Figure II.10 :</b> Schéma d'un onduleur de tension triphasé .....	<b>39</b>
<b>Figure II.11 :</b> couple électromagnétique(a) et vitesse de rotation(b) à vide .....	<b>40</b>
<b>Figure II.12 :</b> Courants statorique pour fonctionnement à vide .....	<b>41</b>
<b>Figure II.13 :</b> couple électromagnétique(a) et vitesse de rotation(b) pour une application d'une charge de 10N.m à t=1s.....	<b>41</b>
<b>Figure II.14:</b> Evolution des courants statoriques à vide puis avec application d'une charge de 10N.m à t=1s .....	<b>42</b>
<b>Figure II.15 :</b> couple électromagnétique(a) et vitesse de rotation(b) pour une application d'une charge de 10N.m à t=0s.....	<b>43</b>
<b>Figure II.16 :</b> Evolution des courants statoriques des phases (abc) lors de fonctionnement en charge de la MSAP (saine) Cr=10N.m à t=0s.....	<b>43</b>
<b>Figure II.17 :</b> Courants de phase et courants de défaut de $\mu=50\%$ et variation de la résistance de défaut (a): $r_f = 10 \Omega$ et, (b): $r_f = 1\Omega$ et, (c): $r_f = 0.1\Omega$ .....	<b>45</b>
<b>Figure II.18</b> Courants de phase ( $i_{as}$ ) et courants de défaut ( $i_f$ ) dans $r_f = 1\Omega$ avec variation de la gravité du défaut $\mu$ , (a) $\mu = 10\%$ , (b) $\mu = 20\%$ , (c) $\mu = 50\%$ .....	<b>47</b>
<b><u>Chapitre III :</u></b>	
<b>Figure III.1:</b> Transformation de Fourier à courte terme (STFT) .....	<b>53</b>
<b>Figure III.2:</b> 2 Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge Cr=10N.m à t=0s (Machine à l'état sain) .....	<b>54</b>
<b>Figure III.3</b> Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge Cr=10N.m à t=0 (Machine avec défaut $\mu=20\%$ et $r_f=5 \Omega$ , t= 0.5s) .....	<b>55</b>
<b>Figure III.4:</b> 4 Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge Cr=10N.m à t=0 (Machine sain et avec défaut $\mu=50\%$ et $r_f=1 \Omega$ , t=0.5s) .....	<b>55</b>
<b>Figure III.5:</b> Evolution temporelle du courant de phase statorique ( $i_{as}$ ) à l'état sain.....	<b>56</b>
<b>Figure III.6:</b> Spectre du courant de phase ( $i_{as}$ ) à l'état sain .....	<b>56</b>
<b>Figure III.7:</b> Spectre du courant de la phase as pour une machine en défaut court-circuit entre spires ; à : (25%) et b : (50%).....	<b>58</b>
<b>Figure III.8:</b> Spectre du courant de la phase $i_{as}$ pour une machine en défaut de court-circuit entre spires avec variation de $r_f$ ; (a) $r_f=10\Omega$ et (b) $r_f=1\Omega$ et $\mu= 50\%$ .....	<b>59</b>

<b>Figure III.9:</b> Le couple électromagnétique et son spectre, en charge ( $C_r=10\text{N.m}$ à $t=0.5\text{s}$ ) (a) $r_f=10\Omega$ , entre $t=0$ et $0.5\text{s}$ (b) $r_f=1\Omega$ , à partir de $t=0.5\text{s}$ . .....	<b>61</b>
<b>Figure III.10:</b> Evolution de la vitesse et son spectre en charge ( $C_r=10\text{N.m}$ ), (a) $r_f=10\Omega$ , entre $t=0$ et $0.5\text{s}$ (b) $r_f=1\Omega$ , à partir de $t=0.5\text{s}$ .....	<b>63</b>
<b>Figure I.11 :</b> Evolution du couple et son spectre : cas où $r_f=0.1\Omega$ et $\mu=0.5$ .....	<b>64</b>
<b>Figure I.12 :</b> Evolution de la vitesse et son spectre cas où : $r_f=0.1\Omega$ et $\mu=0.5$ .....	<b>64</b>
<b>Figure I.13 :</b> Evolution du courant de phase (ia) et son spectre cas où : $r_f=0.1\Omega$ et $\mu=0.5$ ....	<b>65</b>

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la sûreté de fonctionnement est devenue un enjeu majeur pour de nombreux secteurs afin d'assurer une protection optimale des systèmes industriels. En effet, la détection des défaillances dans les équipements industriels, lorsqu'elle est réalisée avec efficacité, représente un des moyens pour éviter la détérioration du matériel d'une part et d'autre part, évite de mettre hors tension des équipements sains (sans défauts).

Les machines électriques sont omniprésentes dans la plus part des systèmes industriels et leur surveillance est un souci permanent. Cependant, ces dernières décennies, les machines synchrones à aimants permanents ont eu un succès dans les applications industrielles et gagnées une plus grande utilisation dans des domaines applicatifs toujours plus diversifiés par exemple comme l'automobile, l'aéronautique, la robotique ou encore le transport ferroviaire. Cela est due à leur efficacité énergétique, leur simplicité de mise en œuvre et leur performance dynamique d'une part et aussi grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents (plus précisément conçue à l'aide des métaux de terres rares), à l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaires.

Malgré les performances remarquables des machines électriques, elles peuvent être affectées par certains défauts qui peuvent être d'origine :

- ✓ mécanique (excentricité du rotor, défaut sur les accouplements, usure des roulements,...).
- ✓ électrique (court-circuit du bobinage statoriques, rupture de barre ou d'anneau,...).
- ✓ magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques).

La naissance d'un défaut dans la machine électrique lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants et la vitesse. D'où la nécessité du diagnostic pour identifier et déterminer les causes des défauts.

L'analyse par traitement du signal des grandeurs de ligne (courant, tension et puissance) peut donner une image réelle sur les déséquilibres qui se produisent dans la machine et fournir ainsi des informations significatives sur les défauts. La modélisation des défauts d'ordre électriques, est une étape nécessaire pour prédire le comportement du système

en présence d'un défaut dès son apparition. Cette prédiction est nécessaire pour les raisons suivantes :

- Permet de donner des signes extérieurs mesurables correspondants à un défaut bien identifié survenu sur une machine électrique.
- Permet d'arrêter ou non la machine selon que le défaut n'est pas très grave ou peut provoquer une détérioration de la machine ou d'une partie de la machine.

L'objectif du présent mémoire est l'établissement d'un modèle suffisamment précis permettant de déterminer rapidement le comportement des différentes variables d'une machine synchrone en présence d'un défaut électrique au niveau du stator dû à un court-circuit entre spires. Sachant que l'apparition d'un défaut électrique au stator modifie la répartition du courant dans les encoches du stator ; notre étude sera orientée vers la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents avec et sans défaut.

Notre mémoire comportera trois chapitres

Dans le premier chapitre nous présenterons les différentes parties d'une machine synchrone, le principe de fonctionnement des machines synchrones à aimants permanents ainsi que leurs champs d'application. Les défauts qui peuvent survenir sur une machine synchrone ainsi que les méthodes de détection de ces défauts.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la MSAP en régime sain et en présence de défauts statoriques (défaut de court-circuit entre les spires). Une transformation mathématique est proposée et appliquée sur les équations du modèle triphasé équivalent de la machine. En effet, nous avons modélisé la machine dans le repère biphasé en utilisant la transformation de Concordia (Clark), la modélisation sera détaillée depuis les équations du modèle triphasé jusqu'à l'obtention des équations finales.

Le troisième chapitre comporte un rappel sur les techniques utilisées en traitement du signal notamment la transformée de Fourier (FFT) suivi de leur application au diagnostic des défauts statoriques (court-circuit entre spires d'une phase statorique).

Enfin, une conclusion générale est donnée et dans laquelle nous discutons les résultats de simulation obtenus.

# **Chapitre I**

*Etat de l'art :*

**Diagnostic des défaillances dans les  
machines synchrones à aimants  
permanents (MSAP).**

# **Chapitre I : Etat de l'art : Diagnostic des défaillances dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP).**

## **I.1 Introduction**

Les machines synchrones à aimants se développent de manière importante à l'heure actuelle, grâce à la mise en point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés. En effet, lorsque le nombre de pôles est élevé, les puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatt. Toutefois, leur domaine d'emploi privilégié reste les puissances inférieures à quelques dizaines de kilowatts, où l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné. Par ailleurs l'emploi d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet Joule au rotor et augmente le rendement.

L'étude des défauts dans les machines synchrones à aimants est un domaine qui a pris une place importante du fait des exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité qui sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels. Lorsque le système est déjà mis en place, il est plus adéquat de prévoir des outils de surveillance ou de diagnostic permettant de déceler un début de défaillance dans un temps raisonnable pour pouvoir y remédier.

Dans ce chapitre, nous allons donner en premier lieu, un aperçu sur les machines synchrones à aimants. Ensuite, nous présenterons les différents défauts, leur classification et leurs origines ainsi que les méthodes de diagnostic employées de nos jours.

## **I.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)**

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est un système électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique à travers le champ magnétique. Cette énergie mécanique produit un mouvement de rotation et un couple mécanique [KBR14]. Le MSAP est constitué d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe) (voir Figure I.1 [KBR14]). Alors que la partie fixe est toujours formée par un enroulement électrique, la spécificité de ce type de machine est liée à l'utilisation d'un aimant permanent relié au rotor pour créer un champ magnétique tournant.



Figure I.1 Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.

### I.2.1 Stator

Un membre fixe ou un membre statique est un terme appelé un composant d'un générateur électrique ou d'un moteur électrique. Les différents types des moteurs électriques asynchrones ou synchrones ne diffèrent que par le rotor, et dans tous les cas, la partie fixe, au moins en principe, reste la même. L'élément immobile (stator) est constitué de feuilles isolées (dans le but de réduire les pertes dans les courants) le fer est moulé avec un matériau ferromagnétique ou du silicium ou d'un cœur de fer. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $2\pi/3$ .

### I.2.2 Rotor

Représente la partie mobile de la MSAP, formée d'un assemblage de tôles et d'aimants créant le flux d'inducteur. Il existe plusieurs types de MSAP qui reposent sur la mise en place d'un aimant permanent sur le rotor de la machine. En effet, l'agencement de l'aimant a un effet direct sur la sécurité de l'appareil (rapport entre l'inductance de l'axe direct  $L_{sd}$  et de l'axe en quadrature  $L_{sq}$ ). En général, on peut distinguer deux types de rotors (Figure I.2) [KBR14] :

- ✚ Dans le premier type, les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor.
- ✚ Par contre, dans le deuxième type, les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent de la position du rotor [KBR14].

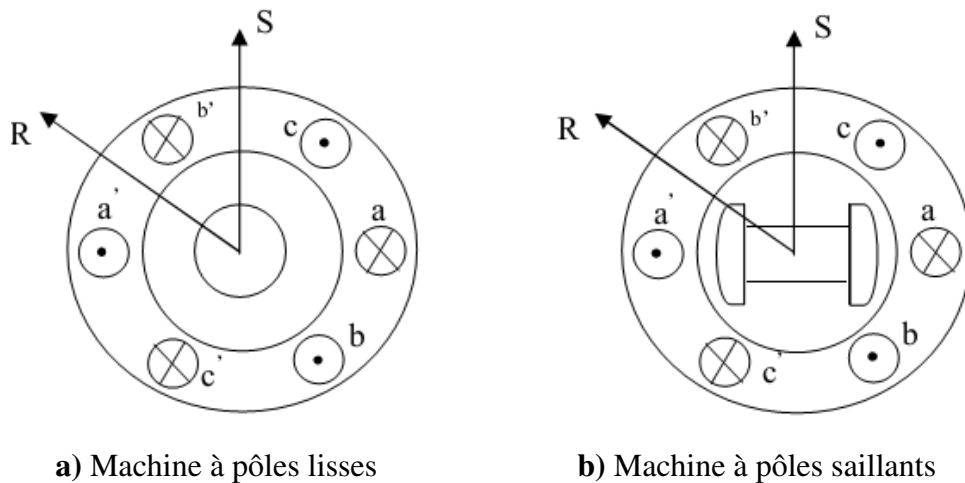


Figure I.2: Formes simplifiées de la machine synchrone selon type du rotor.

### I.3 Principe de fonctionnement de la MSAP

La machine électrique tournante est un dispositif électromagnétique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement moteur) à travers des champs magnétiques. Cette énergie mécanique produit un mouvement de rotation et un couple mécanique. Il se compose principalement de deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre : l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit une force électromotrice ; ces deux parties sont séparées par un entrefer.

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions sinusoïdales. La superposition des trois flux magnétiques crée par les trois bobines du stator produit un flux magnétique sinusoïdal tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi une force électromagnétique. Cette force se traduit par la rotation du rotor. La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la fréquence de la source de tension (Figure I.3) [KBR14].

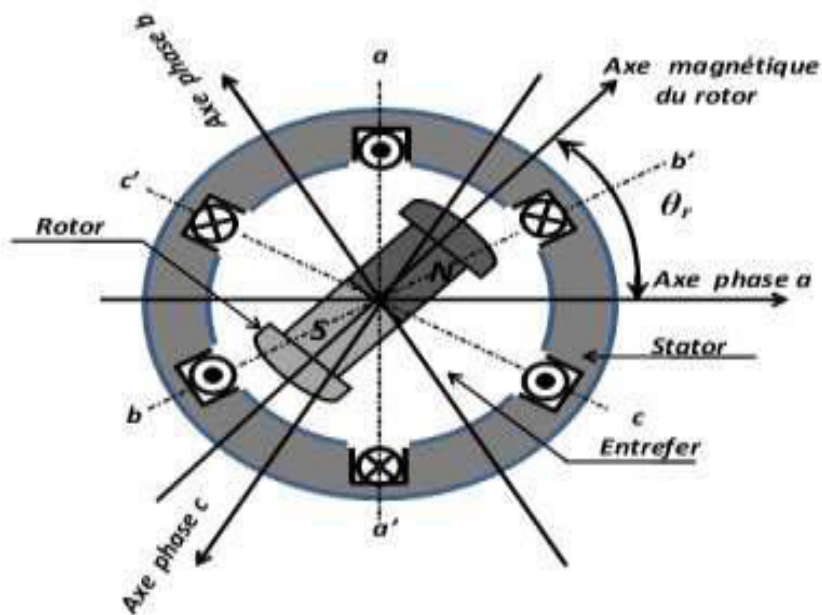


Figure I.3: Représentation du moteur à aimants permanents (MSAP)

#### I.4 Différents types de MSAP

Selon le type du rotor on distingue deux grandes catégories de MSAP à savoir :

- ✚ Machine synchrone avec aimants en surface (MSAS) ou les aimants permanents sont fixés à la surface du rotor.
- ✚ Machine synchrone avec aimants à l'intérieur (MSAI) ou les aimants permanents sont montés à l'intérieur du rotor.

Un MSAI a une plus forte résistance mécanique qu'un MSAS, car les aimants de MSAS ont besoin d'être fixés sur la surface du rotor. Par rapport au comportement magnétique, le rotor du MSAS est symétrique tandis que le rotor du MSAI est asymétrique. Ainsi, les inductances statoriques du MSAS ne varient pas avec la position du rotor. Par contre, les inductances du MSAI varient en fonction de la position du rotor ce qui crée une saillance géométrique du rotor. Cette saillance est très utile pour le contrôle du moteur à basse vitesse [KBR14].

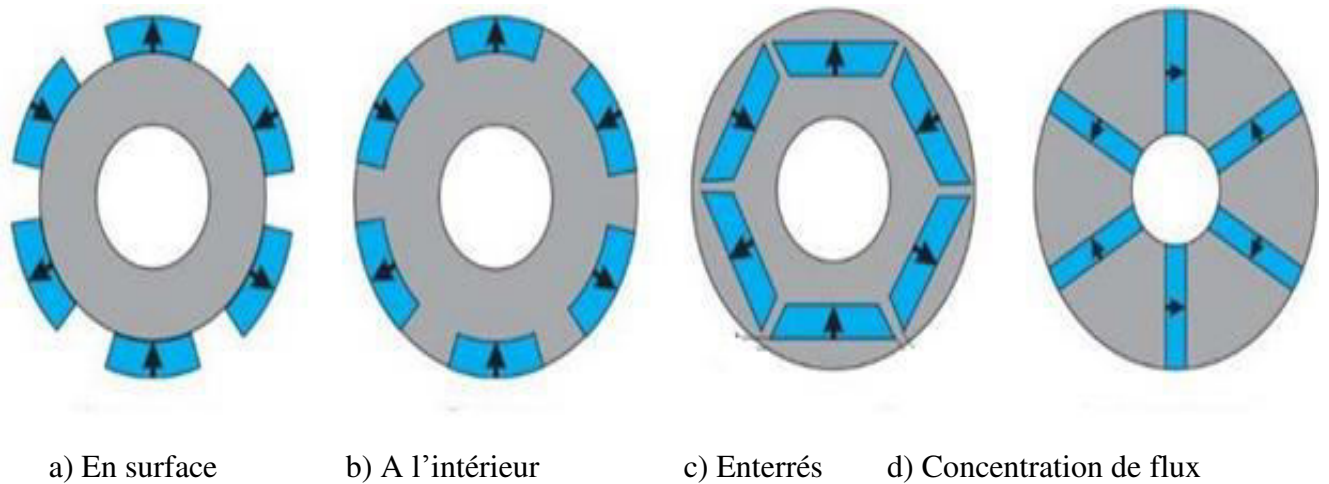


Figure I.4 Différents types de fixation des aimants permanents [AUB14].

L'apparition de nouveaux types d'aimants permanents, dans les années 80, a permis de rendre les MSAP compétitives par rapport aux autres types de machines électriques. Ces nouveaux aimants, appelés « terres rares », sont composés soit de Samarium-Cobalt (SmCo), soit de Néodyme-Fer-Bore (NdFeB). Ils possèdent une densité d'énergie bien plus importante que les autres types d'aimants (ferrite ou AlNiCo) les rendant ainsi beaucoup plus performants [BAU14].

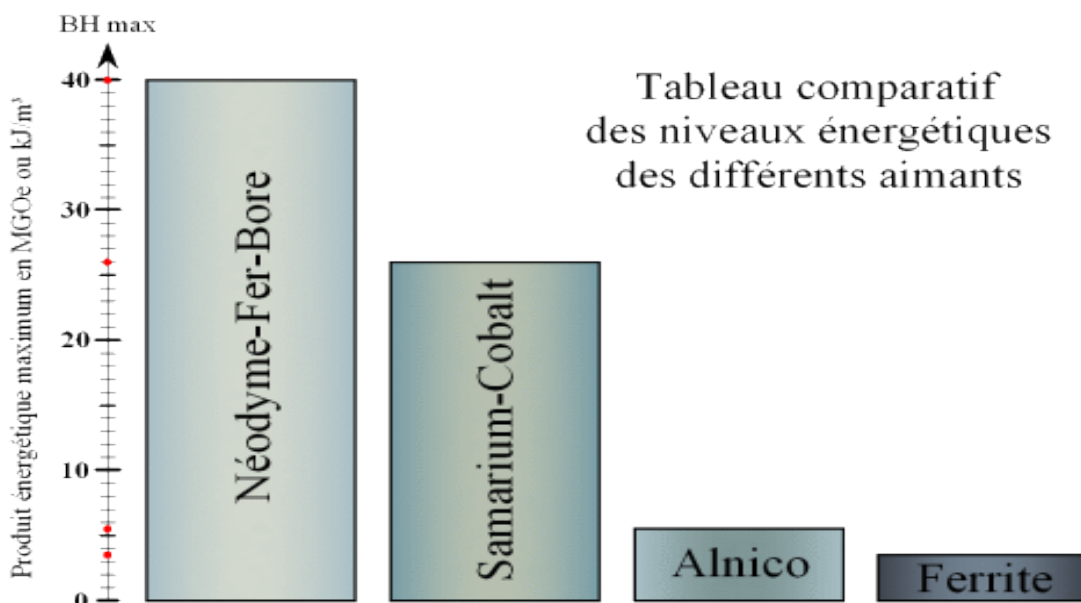


Figure I.5. Niveaux énergétiques des différents aimants [AUB14].

## I.5 Les champs d'applications de la MSAP

Le champ d'utilisation des MSAP à l'heure actuelle est devenu de plus en plus large grâce aux nouveaux matériaux magnétiques plus performants (de type Samarium-Cobalt ou Néodyme-fer-Bore) employés dans la conception des aimants permanents, ce qui rendent les MSAP très compétitives par rapport à d'autres types de machines (machines à courant continu, machines synchrones à rotor bobiné ou machines asynchrones).

Compte tenu de leur compacité et d'absence de pertes au rotor, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans les systèmes embarqués, et dans un certain nombre d'applications telles que :

- Industrie de pétrochimie : les MSAP sont destinées à des fonctionnements à forte puissance (plusieurs MW) et à grande vitesse (> 10.000 tr/min).
- Industrie des énergies renouvelables : plus précisément dans le secteur de l'énergie éolienne. Les MSAP sont destinées à des fonctionnements à haute puissance (plusieurs MW) et à basse vitesse (autour de 1.000 tr/min).
- Industrie automobile : pour la conception de véhicules hybrides ou totalement électriques. Les MSAP sont destinées à des fonctionnements à basse puissance (limitée à quelques dizaines de kW).
- Industrie aéronautique: pour le développement de l'avion plus électrique qui constitue l'un des principaux axes de recherche dans ce domaine. Les puissances mises en jeu peuvent atteindre 175kW.
- Industrie ferroviaire : les MSAP sont destinées à des fonctionnements à moyenne puissance pour la traction, où un générateur à aimants permanents a été dimensionné pour une puissance nominale de 250kW [BAU14].

## I.6 Avantages et inconvénients des MSAP

Il semble que la machine synchrone avec aimant permanent sur la surface est la meilleure option pour le volant. Ces machines présentent de grands **avantages** à savoir :

- Rapports couple / masse et puissance / masse élevés
- Très bonnes performances
- Réduire les coûts de maintenance et réduire les coûts de maintenance (pas de brosses ni de solides).

Cependant, ils ont encore quelques **inconvénients** à savoir :

- Cout élevé (dû au prix de l'aimant).
- Résistance à la température des aimants (250° C pour le sérum-cobalt)
- Risque de démagnétisation magnétique irréversible par réaction des barres d'armature.
- Difficulté dans le flux et la complexité de leur électronique de contrôle (le besoin de détecter la position).
- Impossible d'ajuster l'excitation
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant constant pour retirer la magnétisation de la machine. Cela conduira inévitablement à une augmentation des pertes de la partie fixe de l'influence de joule.
- Le fait de ne pas réguler ce débit ne permet pas une flexibilité de contrôle sur une vitesse très rapide.

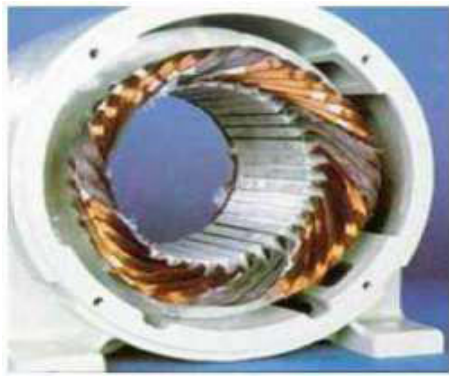
## **I.7 Défaillances dans les machines électriques(MSAP)**

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [Odo 85, BAB09, ZSA15]:

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ... .
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, ... .
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ... .

### **I.7.1 Défaillances statoriques**

La principale source de défauts dans une machine électrique provient des bobinages. Les effets d'usure comme les frottements ou le vieillissement des matériaux ont un effet sur l'intégrité des fils et de leur isolant. Si cet isolant est trop endommagé, ces bobinages peuvent alors se mettre en court-circuit ou alors, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert. Il peut y avoir différents types de défauts dont les conséquences sont différentes [AND12]. Ces différentes fautes sont données sur la Figure I-6 [KBR14].



a) Ouverture d'une phase



b) Court-circuit dans une phase



c) Déséquilibre de l'alimentation



d) Damage dû à la surcharge



e) Masse dans l'encoche



f) Dégradation causée par une surtension

Figure I.6 Différents défauts statoriques.

### I.7.1.1 Les défauts de bobinage statorique

Ceux-ci peuvent être soit une ouverture, soit un court-circuit d'une ou de plusieurs phases du bobinage statorique. Dans le cas d'une spire court-circuitée, la machine peut continuer à fonctionner, mais si le courant de court-circuit est important il peut entraîner une surchauffe de l'enroulement statorique et ainsi amplifier le défaut en produisant des courts circuits entre

deux phases ou entre une phase et le neutre de la machine. Il est donc très important de détecter un tel défaut très rapidement avant la destruction complète de la machine. Comme montre la figure I.7, dans les enroulements statoriques, il peut y avoir cinq cas de défauts à savoir : court-circuit enter-spires, court-circuit à la tête de la bobine, ouverture de la phase, court-circuit phase à phase, court-circuit phase- terre [BOI09].

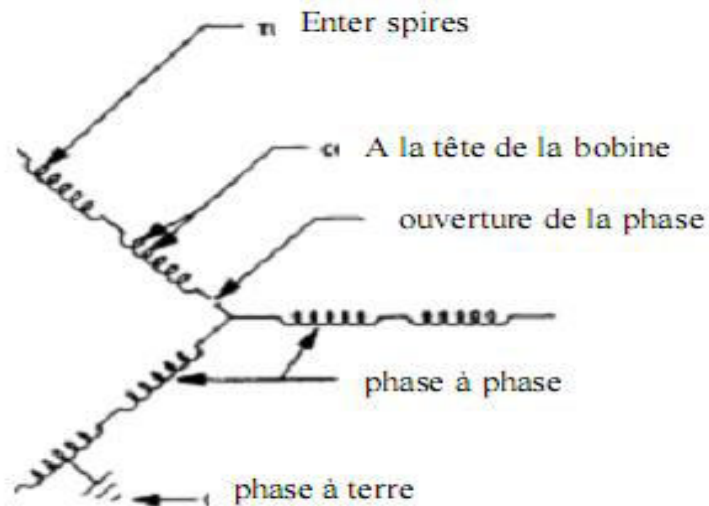


Figure I.7: Les courts-circuits dans les enroulements statoriques

### I.7.1.2 Court-circuit dans une phase

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer [AND12]. Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue. Sur une machine triphasée avec un onduleur à 3 bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important. L'importance des courants de défaut dépend directement du nombre de spires en court-circuit. Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement suite à la panne de la machine. [KBR14].

### I.7.1.3 Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de défaut et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple.

Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum de fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle)[BEL13,BAB09,AND12, KBR14].

### I.7.1.4 Défaits de roulement

Les défauts de roulement occupent une place importante parmi les défauts mécaniques [Bonnett 00, Rajagopalan 06]. En effet, les roulements jouent le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor et assurent le maintien de l'axe de la machine. Il est constitué d'une bague interne, d'une bague externe, d'un corps roulant (billes) et d'un dispositif de lubrification (figure I.8). Un défaut de roulement est soit au niveau des surfaces de contact, soit au niveau des organes de lubrification. Les contraintes mécaniques causées par une surcharge, un mauvais assemblage, une circulation de courant dans les bagues, une mauvaise lubrification, ou même les contraintes environnementales peuvent aboutir à un défaut de roulement [Trajin 09, OHA16].

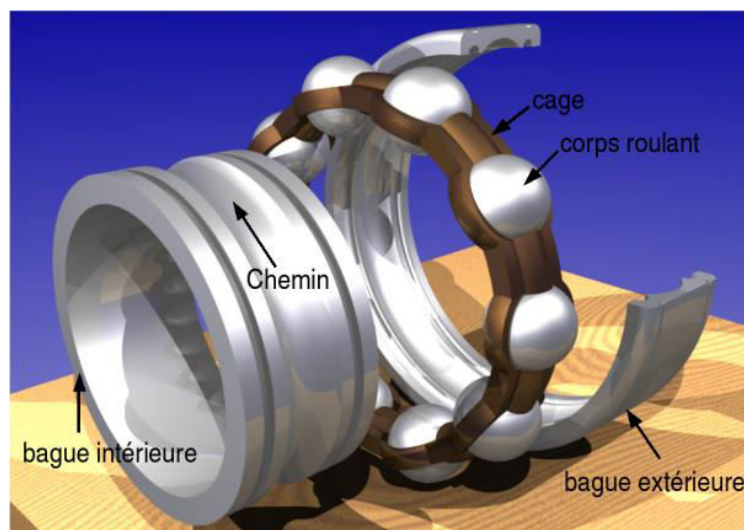


Figure I.8 – Vue éclatée d'un roulement à billes [AUB14].

Ce type de défaut génère des oscillations dans le couple de charge ainsi que des pertes supplémentaires. Les méthodes de détection des défauts de roulement se basent sur une analyse spectrale appliquée à une mesure de vibration ou aux courants statoriques. Lorsque le défaut devient dans un état très avancé, il peut causer le blocage du rotor.

## I.7.2 Défaillances rotoriques

Presque toutes les machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine. , les défaillances sont essentiellement dues à un problème [Bon 92, Nan 99, Rai 00, BAB09]

- ✓ thermique (surcharge,...)
- ✓ électromagnétique (force en  $B^2(t)$ ...)
- ✓ résiduel (déformation,...)
- ✓ dynamique (arbre de transmission,...)
- ✓ environnemental (agression,...)

Les défauts les plus courants, situés sur le rotor, peuvent être définis comme suit :

- Excentricité statique et dynamique et mixte.
- Désaimantation des aimants.

### I.7.2.1 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 défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [And 08]. (Figure I.9)

Trois cas d'excentricité [Sob 98], [Dev 01] 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 les comportements magnétique et mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique 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 [And 08, BAB09, KBR14].

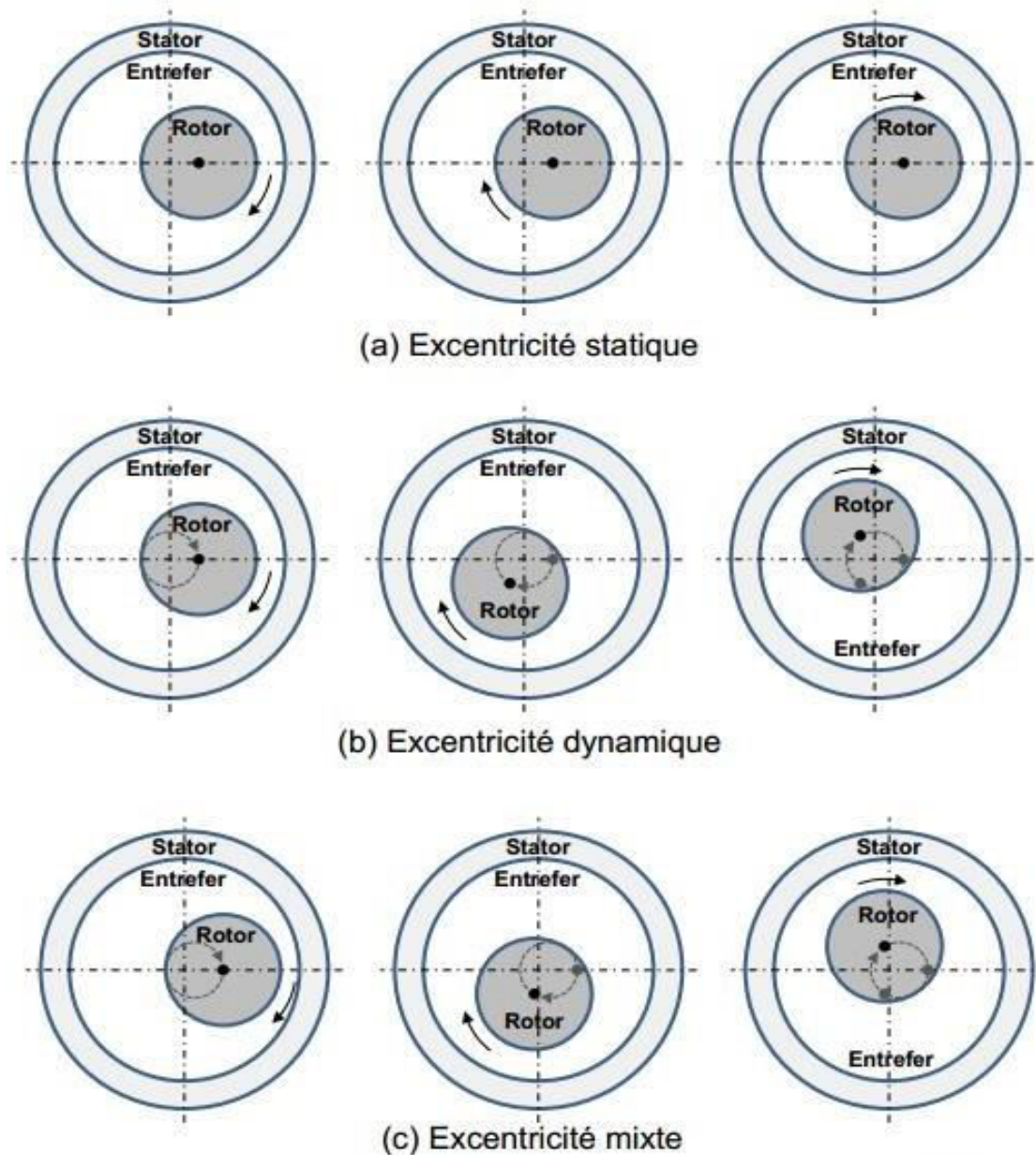


Figure I.9 Différents types d'excentricités [AUB14].

### **1.7.2.2 Les défauts des aimants (Désaimantation)**

Une des problématiques importantes des actionneurs associé avec les aimants permanents (AP) Est la désaimantation des AP. la désaimantation pour les machines à aimants est liée aux pertes Rotor et l'échauffement des aimants, accentuée par un niveau élevé de réaction induit.

Aujourd'hui, la plupart des travaux sur ce sujet concernent le comportement des AP en charge et leur capacité à supporter un champ de réaction magnétique d'induit intense dû à de forts courants. Pourtant, il existe aussi un risque de désaimantation lorsque l'inducteur n'est pas assemblé avec l'induit.

Principalement, on peut distinguer deux situations concrètes. La première concerne le collage des AP de type Nd-Fe-B frittés ou composites (plasto-néodymes). Pour ce dernier type de matériau, l'induction rémanente, et le champ de rigidité limite, décroissent avec la température de fonctionnement de l'AP. Durant la polymérisation de la colle, un passage en étuve peut amener l'inducteur à une température supérieure à 100°C, entraînant une démagnétisation partielle des AP à cause du champ démagnétisant dans l'air. La seconde situation est celle des moteurs à stator réparti en secteurs tels que celui présenté dans. Ce type de moteur présente notamment l'avantage de la modularité, mais, durant une partie de la période de fonctionnement, les AP sont soumis au champ démagnétisant dans l'air. L'utilisation d'AP de type ferrite ou en plasto-ferrite pose alors un problème à basse température, car, pour ce type de matériau, le module du champ coercitif décroît avec la température [BAB09].

## **1.8 Surveillance et diagnostic des défauts de la MSAP**

Le diagnostic de défauts des machines électriques a bénéficié d'un intérêt intense de recherche. La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels.

Un bon diagnostic et une détection précoce de défauts permettent de minimiser le temps d'arrêt ainsi que le temps de maintenance du processus en question. Ils permettent aussi d'éviter Les conséquences nuisibles, parfois dévastatrices, des défauts ainsi que de réduire les pertes nacrères.

Une bonne procédure de détection doit prendre les mesures minimales nécessaires à partir du processus en question, ainsi que d'extraire un diagnostic donnant une indication claire des modes de défaillance, par l'analyse des données, dans un minimum de temps.

De manière générale, lors d'un défaut de bobinage au stator d'une machine électrique, la topologie de la machine est modifiée, ce qui implique la modification de certaines grandeurs caractérisant l'état de la machine. Les manifestations de ces défauts sont perceptibles :

- soit par l'intermédiaire des modifications des propriétés de certains signaux que l'on peut capter sur le dispositif ;
- soit par l'intermédiaire de modifications de certains paramètres physiques du dispositif.

Ces deux possibilités conduisent à définir deux classes de méthodes de surveillance et de diagnostic [KBR14]: une approche dite signal et une approche dite modèle (Figure I.10).

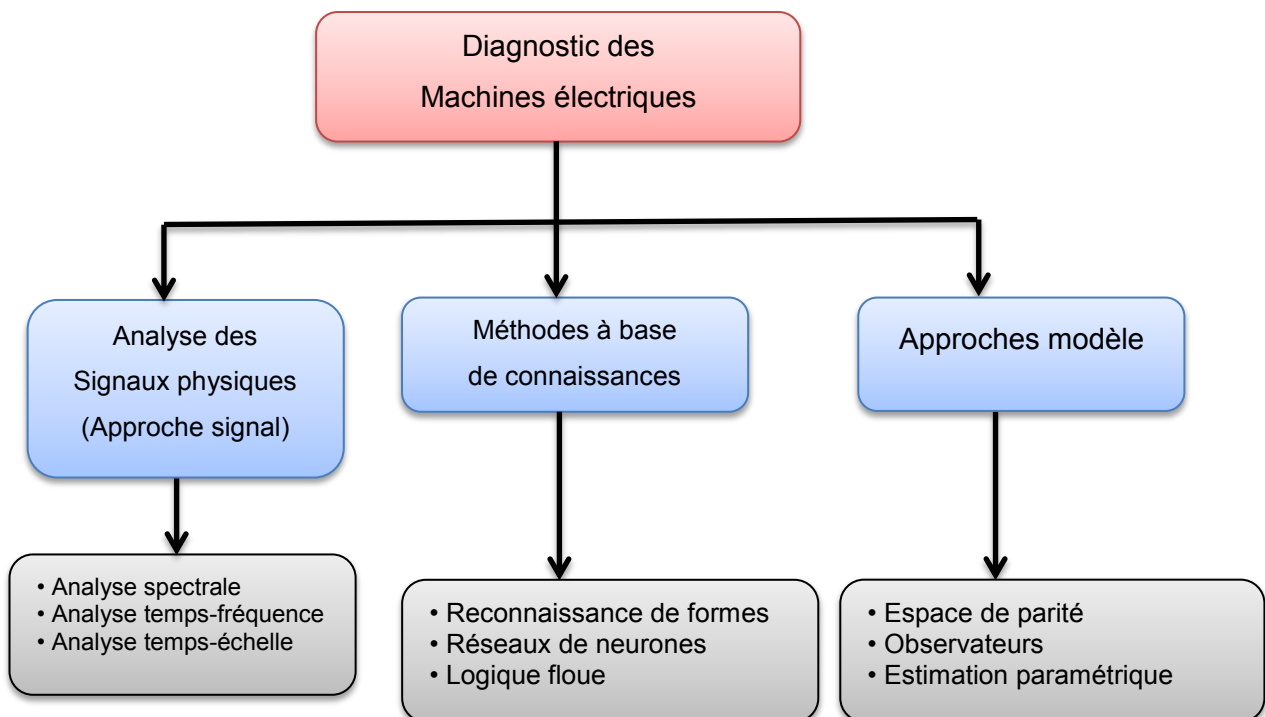


Figure I.10. Différentes méthodes de diagnostic dans les machines électriques

### I.8.1 Approche signal

Le principe de la détection d'un défaut statorique par une approche signal repose sur l'existence, en cas de court-circuit entre-spis, de propriétés particulières de certains signaux physiques prélevés sur la machine en fonctionnement. A partir de modèles de signaux, établis

analytiquement, où à partir de simulation, des signatures témoignant de la présence d'une défaillance peuvent être établis. De nombreux travaux exploitent ces principes en recherchant, par des techniques appropriées de traitement de l'information, à extraire ces signatures, permettant ainsi de statuer sur la présence d'un défaut au stator d'une machine.

Par exemple, dans [Hem02], des mesures vibratoires sont exploitées à l'aide d'outils fréquentiels pour mettre en évidence l'apparition d'harmoniques témoignant de l'apparition de défaillances statoriques. Dans [Mel03, Hen03, Rom05], c'est le flux magnétique rayonné par la machine qui est capté et qui permet, par des traitements fréquentiels appropriés, de détecter l'apparition d'un défaut de bobinage.

Les courants statoriques sont également largement utilisés dans les stratégies de détection diagnostic des défauts statoriques des machines. Les perturbations des forces magnétomotrices induites par les courts-circuits statoriques induisent la présence d'harmoniques supplémentaires sur les courants statoriques des machines. Dans ces signatures fréquentielles particulières sont analysées à l'aide de représentations fréquentielles (FFT, STFT, ...) pour mettre en évidence la présence des défauts.

Dans certains travaux, les courants statoriques sont exploités par l'intermédiaire de transformation comme la transformation de Park [Ser01, Cru03]. Le vecteur courant ainsi obtenu présente alors des propriétés intéressantes pour réaliser une détection des défaillances liées aux courts-circuits statoriques. Par des traitements appropriés, l'amplitude et la phase du vecteur de Park sont analysées pour mettre en évidence l'apparition de composantes fréquentielles témoignant de l'apparition du défaut [KBR14].

## **I.8.2 Approche modèle**

Le principe de la détection de défauts statoriques par une approche modèle repose sur la comparaison du comportement réel de la machine avec celui fourni par un modèle de représentation de la machine auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel. La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain de la machine ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts. Ce principe est illustré sur la Figure I.11 suivante:

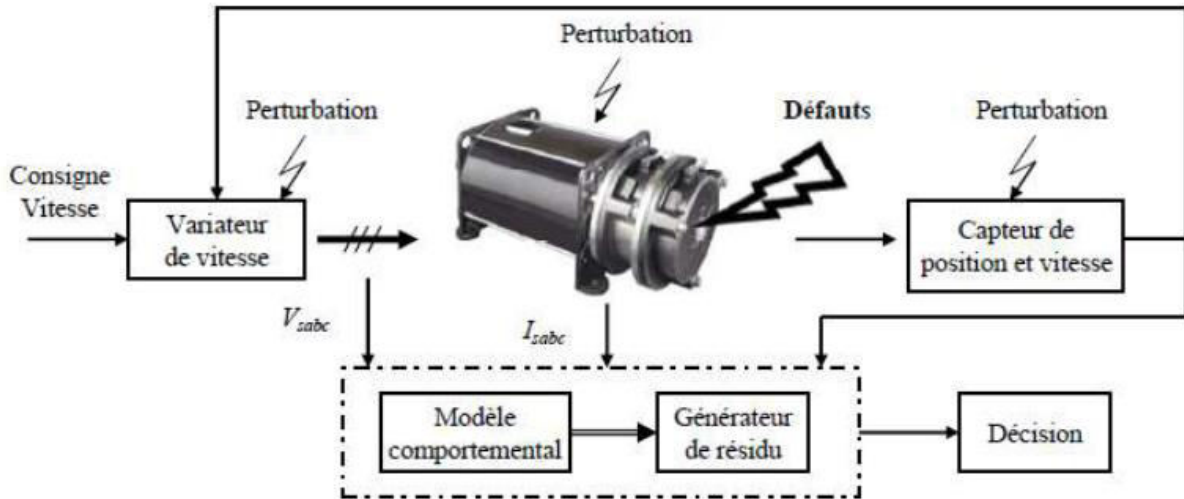


Figure I.11 Principe général de diagnostic par approche modèle [KBR14].

## I.9 Surveillance et diagnostic des défauts de courts-circuits statoriques dans les machines synchrones à aimants permanents

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous avons choisi de nous intéresser plus particulièrement aux machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Ces machines connaissent en effet depuis quelques décennies une forte progression dans les systèmes industriels modernes. On les trouve dans de nombreuses applications telles que l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, le spatial, le médical, les automatismes industrielles, ... etc.

Nous nous intéresserons dans ce présent travail aux défauts électriques du stator des machines à aimants permanents (MSAP). Les défauts de bobinages sont plus répandus. En effet, La MSAP possède une caractéristique de fluxage permanent dû à la présence des aimants permanents au rotor. De ce fait, les courts-circuits inter-spire sont particulièrement critiques, puisque même une déconnexion de la machine de son dispositif d'alimentation ne permettra pas « d'éteindre » le défaut. La présence d'un flux variable dans la spire en court-circuit maintient la présence d'une force électromotrice donc d'un courant pouvant s'avérer destructeur. Ces défauts, auxquels nous nous intéressons plus particulièrement à cause de leur criticité, nécessite donc l'emploi de techniques de surveillance et détection particulièrement réactives pour en connaître au plus tôt les circonstances [BAM16, MAK 09].

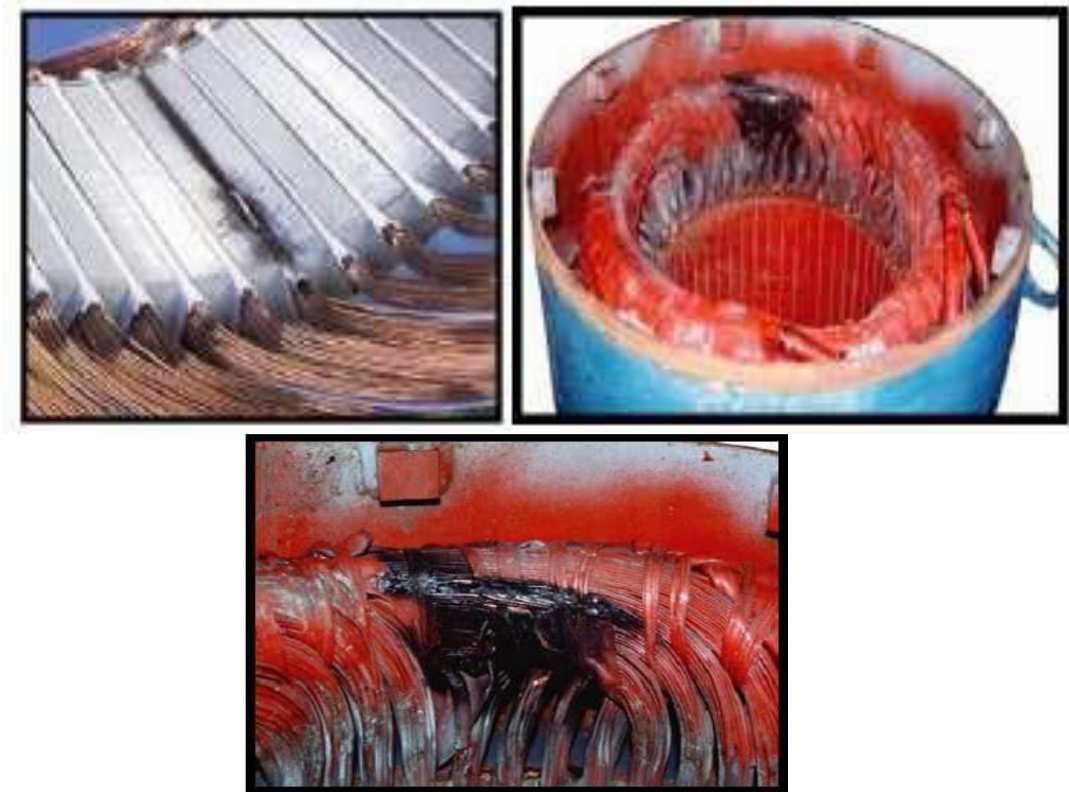


Figure I.12 Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques.

### I.10 Importance de la surveillance des MSAP

Du fait de leurs qualités, les MSAP sont de plus en plus utilisées dans des applications critiques de hautes performances. Dans ce contexte, la détermination de leur état de santé prend une grande importance. Parmi les défaillances possibles, nous nous focaliserons sur les défauts de court-circuit inter spires. Comme nous l'avons déjà évoqué, ces défauts sont souvent précurseurs de défaillances plus graves comme les courts-circuits avec la terre. De plus, ces défauts présentent la particularité d'être auto-entretenus par les aimants du rotor qui impliquent la présence permanente d'une source d'excitation. Ainsi, si un défaut apparaît au cours du fonctionnement, isoler la machine de son dispositif d'alimentation ne suffit pas à garantir sa mise en sécurité. Ces défauts ne peuvent donc pas être maîtrisés tant que la machine développe des forces électromotrices, c'est à dire tant qu'elle est en rotation.

Cela peut conduire à des situations critiques pour l'actionneur lui-même (risques de destruction du bobinage par exemple), mais également pour les autres éléments du système auquel il appartient [BAM16, MAK 09].

## **I.11 Conclusion**

Ce chapitre, a été consacré à la présentation d'un état de l'art sur le diagnostic des défauts des machines synchrones à aimants permanents (MSAP). En effet, nous avons débuté par une représentation générale de la MSAP afin de montrer l'importance de ce type de machine ainsi que ses différents composants. Ensuite, nous avons présenté les différents types de défauts pouvant survenir dans cette machine. Ces défauts peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Un des défauts les plus rencontrés étant le court-circuit entre spires qui est souvent dû à la dégradation de l'isolant suite à un échauffement excessif ou un champ électrique fort.

Nous avons ensuite présenté les différentes méthodes de surveillance des défauts qui reposent souvent sur l'analyse de certaines grandeurs mesurables et l'identification d'une signature d'un défaut déjà connu.

## **Chapitre II**

# **MODELISATION DE LA MSAP EN PRESENCE DE DEFAUT DE COURT- CIRCUIT ENTRE- SPIRES**

## **Chapitre II**

# **Modélisation de la MSAP en présence de défaut de Court-Circuit entre-spires.**

### **II.1 Introduction**

Actuellement, la littérature témoigne d'un grand intérêt porté à la MSAP. En effet, elle a une large utilisation dans le domaine d'entraînements électriques à vitesse variable. De ce fait, il nous a paraît important de lui consacrer toute une partie dans ce mémoire. En effet, sous le nom de machine synchrone, on regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant, pour obtenir un fonctionnement en moteur, le champ magnétique du rotor est généré par des aimants permanents.

En général, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est modélisée par des équations non linéaires. Cette dernière est due aux inductances et aux coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique, donc du temps. Un changement de variable est souvent utilisé afin de diminuer la complexité de ce modèle dynamique, par la réduction du nombre de variables et l'élimination de la position du rotor dans les coefficients des équations différentielles. Dans ce cas, les conditions du régime permanent peuvent être déterminées beaucoup plus facilement et l'analyse de stabilité se fait plus aisément, ainsi que la synthèse de la commande.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'établissement de modèles de la MSAP en présence d'un défaut entre-spire, dont le degré de sévérité, dépend de l'état de l'isolant. Les modèles proposés sont mis sous forme d'équations d'état pour décrire avec précision le comportement dynamique de la MSAP. En effet, la transcription du modèle dynamique sous forme de schéma bloc est à envisager de manière à pouvoir simuler le modèle à l'aide du logiciel Matlab-Simulink.

## II.2 Modélisation des défauts de court-circuit statorique dans les MSAP

Un des défauts les plus communs dans les moteurs électriques est le court-circuit entre spires dans l'un des enroulements du stator. La chaleur accrue due à ce court-circuit peut également mener aux défauts phase à phase ou phase au sol. Le défaut entre spires est dans la plupart du temps est provoqué par effort mécanique, humidité et décharge partielle, qui est accélérée pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs.

La modélisation d'un système exige l'analyse détaillée de la dynamique du système. Cette analyse fournit habituellement des perspicacités sur ces propriétés qui peuvent être employées Comme symptômes de défaut. Le processus modelant fournit la compréhension des exploitations du système et aide ainsi dans le choix des méthodes de détection et diagnostic de défaut les plus appropriées.

Pour concevoir un système de détection et diagnostic de défaut, deux types de modèles de système doivent être développés. Un modèle sain représente la dynamique du système en fonctionnement normal. Les déviations de performance du système de l'exécution décrite par le modèle sain indiquent l'existence des défauts. Par conséquent, le modèle sain peut être employé pour détecter des anomalies dans le système. Afin d'exécuter le diagnostic de défaut pour un défaut déjà détecté, (c'est-à-dire l'endroit et la sévérité (taille) de défaut), un modèle de défaut est nécessaire. Ce modèle devrait tenir en compte des effets de défaut et correctement décrire la dynamique de système sous ces défauts [Mou 11, ZSA15].

### II.2.1 Modèle de la MSAP à l'état sain

Les machines synchrones à aimants permanents sont des moteurs sans balais avec une distribution sinusoïdale des enroulements statorique. Le flux d'excitation vient des aimants situés sur ou à l'intérieur du rotor. Les lois de Kirchhoff sont appliquées pour développer le modèle électrique de la machine montrée dans la figure II.1. Ce modèle adopte les hypothèses simplificatrices suivantes [Far 08, Lui 06, ZSA15] :

- Les pertes fer au stator et rotor sont négligées ;
- L'effet amortissement au rotor est négligé ;
- La perméabilité magnétique des parties ferromagnétique est considérée comme infinie,
- Le phénomène de saturation est négligé ;
- Le bobinage statorique des MSAP saines triphasées à rotor lisse est supposé équilibré.
- La distribution des force magnétomotrice et le flux est considérée sinusoïdale.

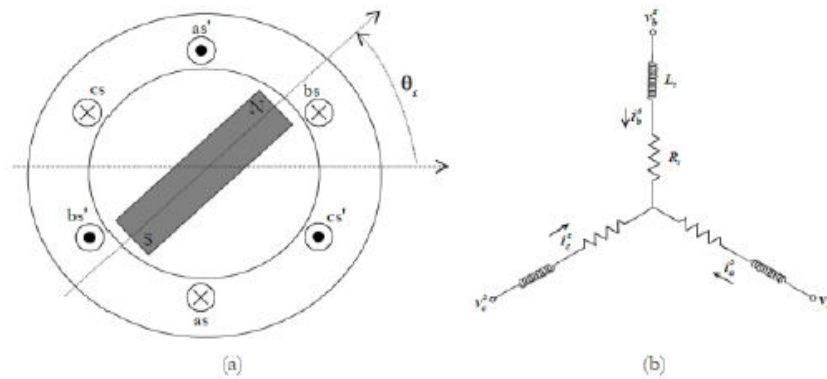


Figure II.1 : Schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d'une MSAP

Ces Hypothèses sont normalement connues comme étant appropriées pour un modèle de paramètres globale pour les moteurs électriques [Far 08]. La figure (II.1) est une illustration Schématique d'une MSAP triphasée à deux pôles. Les symboles  $V_s$  et  $i_s$  représentent respectivement les tensions et les courants dans chaque phase,  $R_s$  et  $L_s$  et  $N_s$  sont respectivement les résistances, l'inductance et le nombre des spires de chaque bobine des trois phases statorique [ZSA15].

Sans saturation magnétique, le modèle électrique de la machine à trois phases dans le repère 'abc' est le suivant :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + [E_s] \quad (\text{II.1})$$

Où :

$[V_s] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T$  est le vecteur des tensions de phases

$[i_s] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$  est le vecteur des courants de phase

$[E_s] = [e_a \quad e_b \quad e_c]^T$  est le vecteur des fém. de phases.

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$  est la matrice de résistance :  $R_s = R_a = R_b = R_c$

$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix}$  est la matrice d'inductance qui est circulante symétrique.

En général, les trios phases du stator sont connectées en étoile de sorte que :

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Dans ces conditions, la composante homopolaire du courant est nulle et seule l'inductance cyclique de la machine ( $L_c = L - M$ ) limite les courants de phases, ce qui permet d'écrire :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + L_c \frac{d}{dt} [i_s] + [E_s] \quad (\text{II.3})$$

Cependant, les équations (II.1) et (II.3) n'intègrent pas le fait que la composante homopolaire du courant est nulle (II-2). Pour cela, il suffit d'appliquer la transformation de Concordia ( $C'_{32}$ ) à l'équation électrique générale de la machine synchrone ; la composante homopolaire du courant étant nulle, nous réduisons ainsi l'ordre du système pour prendre en compte la relation (II.3) et retrouvons les équations de la machine diphasée équivalente :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = T'_{32} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} ; T'_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

La grandeur généralisée  $X$  représente ici le courant, la tension ou la fém. La composante homopolaire du courant étant nulle, le couple électromagnétique de MSAP à rotor lisse peut être exprimé comme suit :

$$Ce = \frac{(e_{as} i_{as} + e_{bs} i_{bs} + e_{cs} i_{cs})}{\Omega} = \frac{e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta}{\Omega} \quad (\text{II.6})$$

La dynamique de la vitesse de la machine et de sa charge, est décrite par la relation fondamentale de la dynamique appliquée aux solides en mouvement de rotation :

$$Ce - Cr = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (\text{II.7})$$

Où :  $J$  est le moment d'inertie des parties tournantes,  $C_r$  est le couple de charge et  $\Omega$  la vitesse de rotation. Pour une machine à  $P$  paires de pôles, cette vitesse est liée à l'angle électrique  $\theta$ , désignant la position du rotor, par la relation :

$$\frac{d}{dt} \theta = P \Omega \quad (\text{II.8})$$

Pour une simulation en régime transitoire, nous mettons l'ensemble des équations régissant la machine sous forme d'état. L'équation électrique devient alors :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} (-R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha - e_\alpha \\ V_\beta - e_\beta \end{bmatrix}) \quad (\text{II.9})$$

Sous la forme matricielle :

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (\text{II.10})$$

Où :

$X = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$  : Vecteur des variables d'état

$u = \begin{bmatrix} V_\alpha - e_\alpha \\ V_\beta - e_\beta \end{bmatrix}$  : le vecteur d'entrée

Les matrices  $A$  et  $B$  ont pour expressions :

$$A = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad B = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La figure (II.2) présente ainsi une représentation du modèle électrique de la MSAP saine (diagramme fonctionnel).

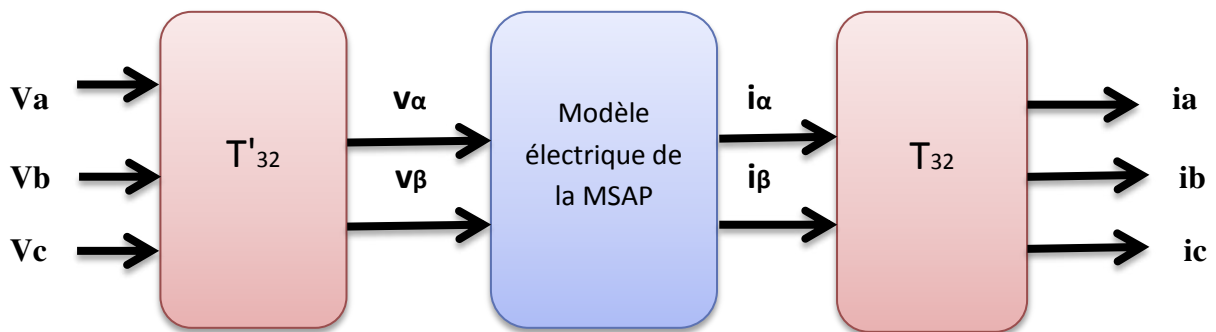


Figure II.2 : Schéma bloc du modèle électrique de la MSAP saine

### II.2.2 Modèle de la MSAP en présence de défaut de court-circuit

On désigne par le court-circuit entre-spires tout défaut d'isolation pouvant intervenir entre deux spires d'une même phase du stator. Le défaut n'est pas forcément franc et une résistance équivalente permet de modéliser ce qui reste de la résistance de l'isolant entre les spires court-circuitées. La valeur de la résistance indique la sévérité du défaut d'isolation. Un schéma Simplifié de la situation est donné sur la figure (II.3) montrant la résistance  $r_f$  du défaut.

Le bobinage dans lequel survient le défaut est donc divisé en deux parties que l'on appellera ( $as2$ ). Pour la partie court-circuitée et ( $as1$ ) pour la partie saine. En pratique la résistance  $r_f$  varie depuis une valeur infinie lorsque la machine est saine à zéro lorsque la machine est en présence d'un défaut franc de court-circuit entre-spires. Il est donc intéressant de déterminer le comportement de la machine lorsque cette résistance est suffisamment grande pour ne pas induire la destruction du bobinage et suffisamment petite pour que son effet soit perceptible sur les courants absorbés par la machine [Vas 09, ZSA15, BAB09].

On définit le coefficient  $\mu$  qui décrit le nombre relatif de spires court-circuitées. On a donc :

$$N_f = N_{as2} = \mu(N_{as1} + N_{as2}) = \mu N_s \quad (\text{II.11})$$

Où :  $N_s$  est le nombre de spires par phase et  $N_f$  est le nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut (sous-bobine  $as2$ ).

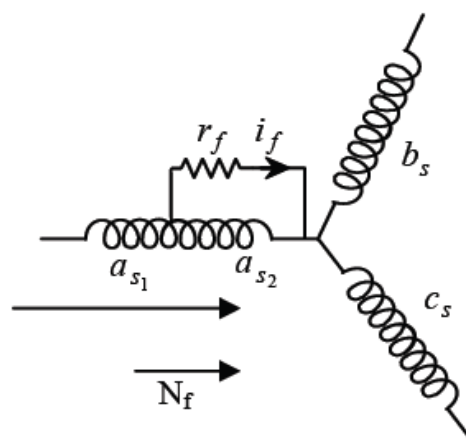


Figure II.3 : Représentation schématique d'un défaut d'isolation entre spires sur une phase de stator (as)

### II.2.2.1 Modèle de la MSAP en présence d'un défaut entre-spires dans le repère (abc)

Par rapport à la nomenclature présentée ci haut, les équations électriques dans les deux parties qui composent la phase  $as$  (sous-bobines  $as1$  et  $as2$  sur la figure II.4) sont données par :

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= R_{a1} i_{a1} + L_{a1} \frac{d}{dt} i_{as} + M_{a1a2} \frac{d}{dt} (i_{as} - i_f) + M_{a1b} \frac{d}{dt} i_{bs} + M_{a1c} \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{a1} \\
 V_{as2} &= R_{a2} (i_{as} - i_f) + L_{a2} \frac{d}{dt} (i_{as} - i_f) + M_{a1a2} \frac{d}{dt} i_{as} + M_{a2b} \frac{d}{dt} i_{bs} + M_{a2c} \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{a2}
 \end{aligned}
 \tag{II.12}$$

Où  $R_{a2}$  et  $L_{a2}$  représentent la résistance et l'inductance de la sous-bobine en défaut ( $a_{s2}$ ). Les paramètres  $M_{a1a2}$ ,  $M_{a2b}$  et  $M_{a2c}$  représentent respectivement les inductances mutuelles entre la sous-bobine  $a_{s2}$  et les bobines  $a_s$ ,  $b_s$  et  $c_s$ .

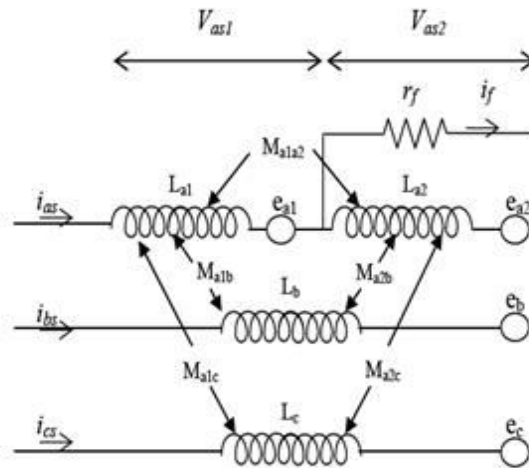


Figure II.4 : Schéma équivalente de la machine à aimants avec défaut entre-spires dans la phase (as)

Les résistances de la sous-bobine saine  $as1$  et de la sous-bobine court-circuitée  $as2$  sont notées par  $R_{a1}$  et  $R_{a2}$  respectivement ; elles sont proportionnelles au nombre de spires des parties concernées. Par conséquent, nous pouvons les exprimer en fonction de la résistance de phase  $R_a$  et le coefficient  $\mu$ . Nous avons donc :

$$\begin{aligned}
 R_{a1} &= (1 - \mu)R_a \\
 R_{a2} &= \mu R_a
 \end{aligned}
 \tag{II.13}$$

L'étude des circuits élémentaires de la phase as donne les relations suivantes :

$$V_{as} = V_{as1} + V_{as2} \quad ; \quad V_{as2} = r_f i_f \quad (\text{II.14})$$

$$i_{as1} = i_{as} \quad ; \quad i_{as2} = i_{as} - i_f$$

Les équations des tensions des trois phases sont donc mises sous la forme :

$$\begin{aligned} V_{as} &= (R_{a1} + R_{a2})i_{as} + (L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1a2})\frac{d}{dt}i_{as} + (M_{a1b} + M_{a2b})\frac{d}{dt}i_{bs} \\ &\quad + (M_{a1c} + M_{a2c})\frac{d}{dt}i_{cs} + (e_{a1} + e_{a2}) - R_{a2}i_f - (L_{a2} + M_{a1a2})\frac{d}{dt}i_f \\ V_{bs} &= R_s i_{bs} + L_s \frac{d}{dt}i_{bs} + e_{bs} + (M_{a1b} + M_{a2b})\frac{d}{dt}i_{as} + M \frac{d}{dt}i_{cs} - M_{a2b} \frac{d}{dt}i_f \\ V_{cs} &= R_s i_{cs} + L_s \frac{d}{dt}i_{cs} + e_{cs} + (M_{a1c} + M_{a2c})\frac{d}{dt}i_{as} + M \frac{d}{dt}i_{bs} - M_{a2c} \frac{d}{dt}i_f \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

Les relations suivantes sont normalement admises :

$$\begin{aligned} R_s &= R_a = R_{a1} + R_{a2} \\ L_s &= L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1a2} \\ M &= M_{a1b} + M_{a2b} = M_{a1c} + M_{a2c} \\ e_a &= e_{a1} + e_{a2} = e_{a1} + e_f \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

En remplaçant les relations ci-dessus (II.16) dans les équations électriques (II.15), on obtient l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{a2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f - \begin{bmatrix} L_{a2} + M_{a1a2} \\ M_{a2b} \\ M_{a2c} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} i_f \quad (\text{II.17})$$

D'après l'équation établie, nous voyons que l'équation qui régit la machine en présence d'un défaut entre-spires contient les mêmes termes que l'équation électrique d'une machine saine (II.1 ou II.3) auxquels s'ajoutent des termes supplémentaires correspondant à la maille créée par le défaut. La résolution de l'équation (II.17) nécessite la connaissance du courant  $i_f$  ou alors d'ajouter une équation supplémentaire décrivant la maille du court-circuit. On a alors :

$$0 = -R_{a2}i_{as} - (L_{a2} + M_{a1a2})\frac{d}{dt}i_{as} - M_{a2b}\frac{d}{dt}i_{bs} - M_{a2c}\frac{d}{dt}i_{cs} - e_{a2} + (R_{a2} + r_f)i_f + L_{a2}\frac{d}{dt}i_f \quad (\text{II.18})$$

Suite à un défaut de court-circuit entre-spires, l'ordre du système croit. En effet, une maille Supplémentaire apparaît. Alors, il est intéressant de présenter une matrice d'inductance de dimension 4 pour modéliser la MSAP en défaut. Nous rassemblons donc les équations (II.17) et (II.18) pour obtenir l'équation globale de dimension 4 régissant le comportement de la machine en présence d'un défaut de court-circuit, que l'on met sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ -R_{a2} & 0 & 0 & R_{a2} + r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & -L_{a2} - M_{a1a2} \\ 0 & L_s & 0 & -M_{a2b} \\ 0 & 0 & L_s & -M_{a2c} \\ -L_{a2} - M_{a1a2} & -M_{a2b} & -M_{a2c} & L_a \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \\ -e_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Où : } e_f = e_{a2}$$

Pour les machines à plus d'une encoche par pôle et par phase, les axes des sous-bobines  $as1$  et  $as2$  ne sont généralement pas alignés et sont décalés par rapport à celui de la bobine  $as$  ; de ce fait on a :  $M_{a1b} \neq M_{a1c}$  et  $M_{a2b} \neq M_{a2c}$ . Par contre pour une machine ayant une encoche par pôle et par phase, les axes des sous-bobines  $as1$  et  $as2$  sont alignés et sont non décalés par rapport à celui de la bobine  $as$  ; dans ce cas on peut admettre que  $M_{a2b} = M_{a2c}$  et alors on peut simplifier les équations (II.18) et (II.19) comme :

$$0 = -R_{a2}i_{as} - (L_{a2} + M_{a1a2} - M_{a2b}) \frac{d}{dt} i_{as} - e_{a2} + (R_{a2} + r_f)i_f + L_{a2} \frac{d}{dt} i_f \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ -R_{a2} & 0 & 0 & R_{a2} + r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & -L_{a2} - M_{a1a2} \\ 0 & L_s & 0 & -M_{a2b} \\ 0 & 0 & L_s & -M_{a2b} \\ -(L_{a2} + M_{a1a2} - M_{a2b}) & 0 & 0 & L_a \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \\ -e_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

On n'a pas besoin de prendre cette hypothèse dans notre étude mais on peut simplifier le modèle de la machine avec défaut entre-spires pour une MSAP à une encoche par pôle et par phase. On a ainsi établi les équations électriques régissant le comportement de la machine en régime dynamique en présence d'un défaut de court-circuit entre spires dans une phase. On n'a pas encore introduit le comportement mécanique qui dépend des couples de moteur et de frein. Ces

couples ont une influence sur la vitesse de rotation et par conséquent sur les valeurs des f.é.m. induites dans les différentes bobines du stator.

Si le couple de détente est négligeable, l'expression de couple électromagnétique de la MSAP en défaut électrique entre-spires est donné par :

$$C_e = (e_{as}i_{as} + e_{bs}i_{bs} + e_{cs}i_{cs} - e_f i_f) / \Omega \quad (\text{II.22})$$

### II.2.2.2 Modèle de la MSAP en présence d'un défaut entre-spires dans le repère $(\alpha, \beta)$

Les phases du stator étant connectées en étoile sans liaison du neutre, nous avons :

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (\text{II.23})$$

Dans ces conditions, la composante homopolaire du courant est nulle et seule les composantes  $\alpha$   $\beta$  du courant interviennent dans la conversion électromécanique d'énergie.

Cependant, les équations II.17 et II.18 (ainsi que II.19 ou II.21) n'intègrent pas le fait que la composante homopolaire du courant est nulle (II.26). Pour cela, il suffit d'appliquer la transformation de Clark à l'équation électrique II.17 ou de remplacer les composants  $abc$  du courant par leurs expressions en fonction des composantes  $\alpha$   $\beta$  du courant.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} R_{a2} \\ 0 \end{bmatrix} i_f - \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \left( L_{a2} + M_{a1a2} - \frac{M_{a2b} + M_{a2c}}{2} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (M_{a2b} - M_{a2c}) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} i_f \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{aligned} 0 = & \sqrt{\frac{2}{3}} R_{a2} i_{as} - \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ L_{a2} + M_{a1a2} - \left( \frac{M_{a2b} + M_{a2c}}{2} \right) \right] \frac{d}{dt} i_\alpha - \frac{1}{\sqrt{2}} (M_{a2c} - M_{a2b}) \frac{d}{dt} i_\beta - e_{a2} + (R_{a2} + r_f) i_f \\ & + L_{a2} \frac{d}{dt} i_f \quad (\text{II.25}) \end{aligned}$$

Les équations II.24 et II.25 peuvent être regroupées pour obtenir le modèle matriciel de la MSAP en défaut électrique entre-spires :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R'_{a2} \\ 0 & R_s & 0 \\ -R'_{a2} & 0 & R'_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha} \\ 0 & L_s & M_{f\beta} \\ M_{f\alpha} & M_{f\beta} & L_{a2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ -e_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$R'_{a2} = \sqrt{\frac{2}{3}} R_{a2} \quad ; \quad R'_f = R_{a2} + r_f \quad ; \quad e_f = e_{a2}$$

$$M_{f\alpha} = -\sqrt{\frac{2}{3}} [L_{a2} + M_{a1a2} - ((M_{a2b} + M_{a2c})/2)] \quad ; \quad M_{f\beta} = -\frac{1}{\sqrt{2}} (M_{a2b} + M_{a2c})$$

Dans cette partie, nous introduisons une transformation basée sur la transformation de Concordia à laquelle nous ajoutons une ligne et une colonne représentant le courant de défaut.

Cette grandeur ne subit pas de projection spéciale sur un autre système de coordonnées. Nous appellerons cette transformation : transformation de Concordia étendue définie comme suit :

$$[\mathbf{X}_{ha\beta f}] = [\mathbf{T}][\mathbf{X}_{abcf}] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$[\mathbf{T}]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

Pour les MSAP à une encoche par pôle et par phase ( $M_{a2b} = M_{a2c}$ ), l'équation (II.26) se simplifie et devient :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R'_{a2} \\ 0 & R_s & 0 \\ -R'_{a2} & 0 & R'_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha} \\ 0 & L_s & M_{f\beta} \\ M_{f\alpha} & M_{f\beta} & L_{a2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ -e_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$R'_{a2} = \sqrt{\frac{3}{2}} R_{a2} \quad ; \quad R'_f = R_{a2} + r_f \quad ; \quad e_f = e_{a2}$$

$$M_{f\alpha} = -\sqrt{\frac{2}{3}} (L_{a2} + M_{a1a2} - M_{a2b}) \quad ; \quad M_{f\beta} = 0$$

Nous signalons que dans ce cas d'après l'équation (II.28), le courant  $i_f$  est indépendant du courant  $i_\beta$  ; il dépend uniquement du courant  $i_\alpha$ . Ceci est dû au fait que le défaut est supposé Survenir sur la phase  $as$  et que les mutuelles avec les deux autres phases sont identiques.

Autrement dit, la phase en défaut de court-circuit entre-spires est considérée comme la première phase ( $a$ ) et  $\theta$  est donc l'angle électrique désignant la position de l'axe d'excitation (axe de symétrie d'un aimant) et l'axe de symétrie de la phase  $a$ .

Suivant le modèle présentée, le couple électromagnétique peut être donné par :

$$C_e = (e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta - e_{a2} i_f) / \Omega \quad (\text{II.29})$$

### II.2.2.3. Mise sous forme d'état

Pour l'étude de la machine en régime dynamique nous mettons l'ensemble des équations de la machine dans le référentiel  $(\alpha, \beta, f)$  sous forme d'état afin de pouvoir simuler tel ou tel régime transitoire. Nous avons donc :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha} \\ 0 & L_s & M_{f\beta} \\ M_{f\alpha} & M_{f\beta} & L_{a2} \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R'_{a2} \\ 0 & R_s & 0 \\ -R'_{a2} & 0 & R'_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha - e_\alpha \\ V_\beta - e_\beta \\ e_f \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II.30})$$

Nous définissons le vecteur des variables d'état ( $x$ ) et le vecteur des tensions d'entrée ( $u$ ) de la manière suivante :

$$x = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_f \end{bmatrix} ; \quad u = \begin{bmatrix} v_\alpha - e_\alpha \\ v_\beta - e_\beta \\ e_f \end{bmatrix}$$

De sorte que l'équation de la machine soit écrite sous la forme de l'état ( $\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$ ), nous avons :

$$A = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha} \\ 0 & L_s & M_{f\beta} \\ M_{f\alpha} & M_{f\beta} & L_{a2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_s & 0 \\ -R'_{a2} & 0 & R'_f \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha} \\ 0 & L_s & M_{f\beta} \\ M_{f\alpha} & M_{f\beta} & L_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Les équations d'état que nous venons d'établir peuvent être schématisées sous une forme en bloc introduisant la transformation de Concordia afin d'avoir les grandeurs de phases comme grandeurs d'entrée et sortie. Cette modélisation sous schéma bloc, présentés sur la figure II.5.

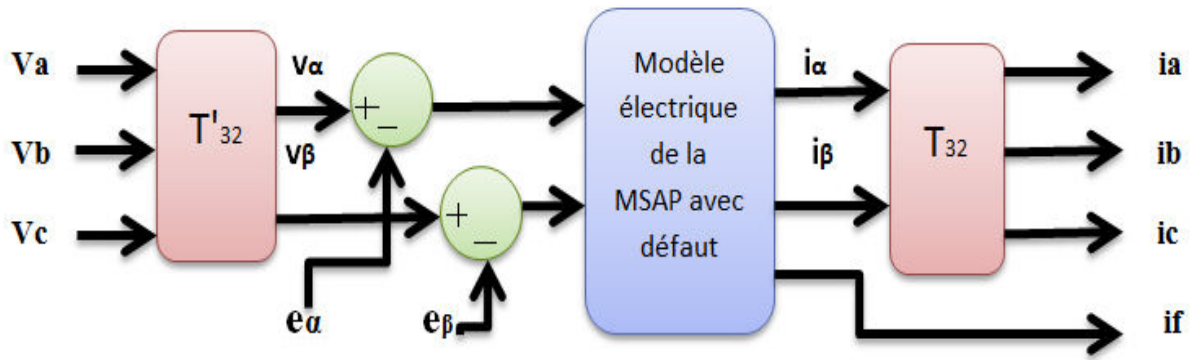


Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de la machine en régime dynamique

**II.3.Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension :**

**II.3.1 Modélisations du redresseur et du filtre associés à l'onduleur :**

Pour alimenter le circuit intermédiaire, le moyen le plus simple consiste en un redresseur à diodes en pont triphasé, assurant la conversion de la tension alternative générée par le réseau Triphasé en une tension continue. Après un étage de filtrage, l'onduleur est alimenté par une source de tension continue  $V_{dc}$ . Les commutateurs d'un même bras de l'onduleur sont toujours complémentaires. Chaque interrupteur de puissance est réalisé par un IGBT en antiparallèle avec une diode, où ces composants sont supposés parfaits [KBR14].

L'alimentation  $V_{dc}$  est assurée par l'intermédiaire de l'ensemble redresseur et filtre, présenté par le montage de la (figure II.6) ci-dessous :

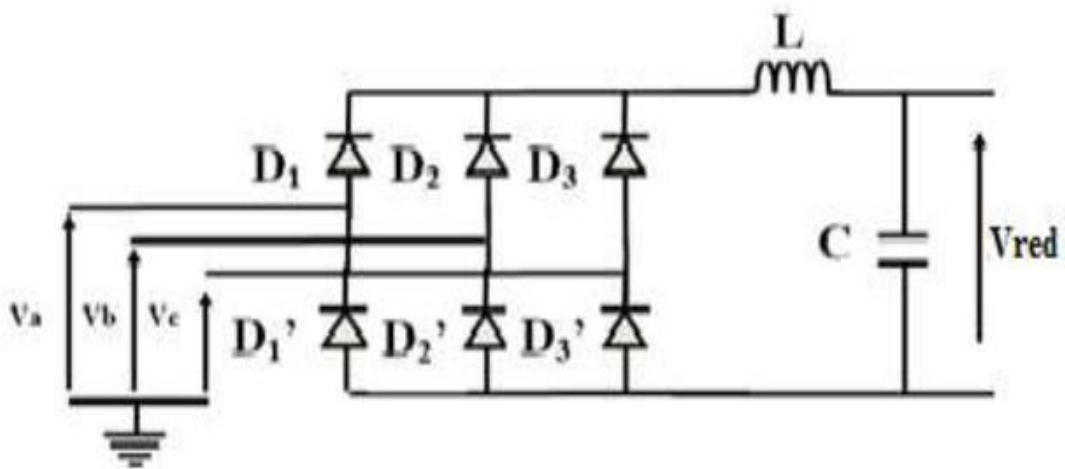


Figure II.6 Schéma de configuration de l'association Redresseur triphasé-filtre

### II.3.1.1 Modélisation du redresseur triphasé

Nous utilisons un pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées. Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit, l'une des deux diodes  $D_2$  et  $D_3$  conduit également, il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ , ou encore :

$$V_1 = \max(V_j) ; j=1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ Conduit si } V_i = \max(V_j) ; j=1, 2, 3 ; i=1, 2, 3.$$

$$D_i' \text{ Conduit si } V_i = \min(V_j) ; j=1, 2, 3 ; i=1, 2, 3.$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie de redresseur est :

$$U_d = \max(V_j) - \min(V_j) ; j=1, 2, 3. \quad (\text{II.15})$$

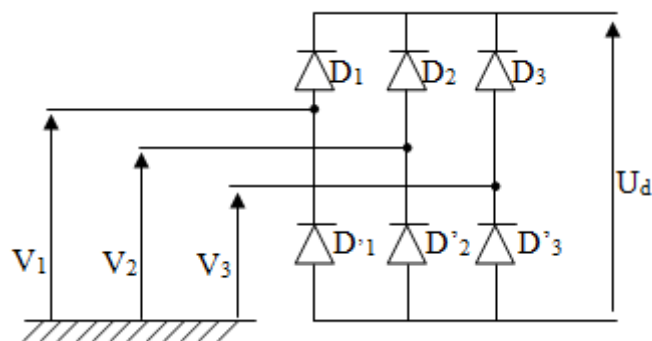


Figure II.7 : Redresseur à diodes.

### Simulation numérique :

La simulation numérique du redresseur donne la forme de la tension redressée représentée à la figure (II.8) suivante.

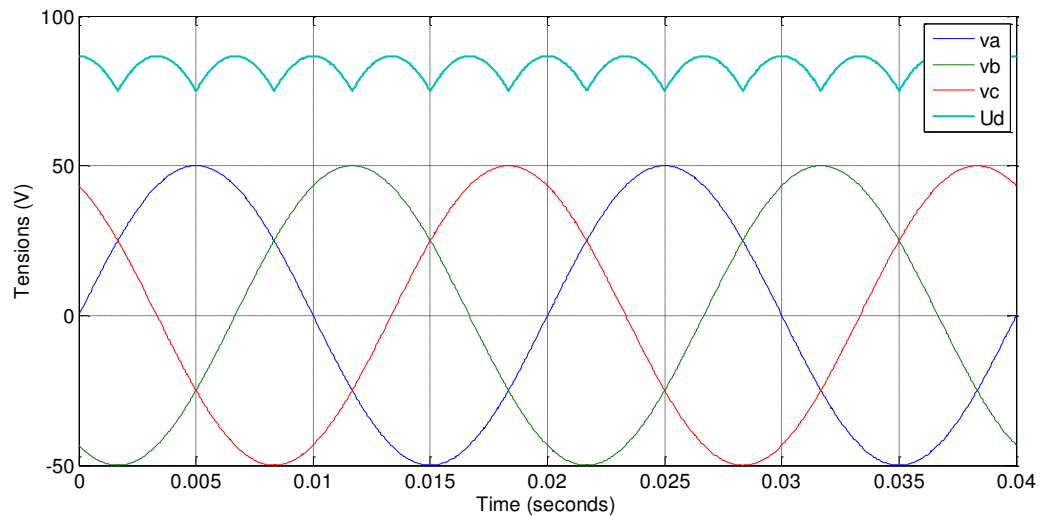


Figure II.8 : Tensions de phases ( $V_{abc}$ ) et la tension redressée  $U_d$

La tension  $U_d$  obtenue présente la tension redressée instantanée. Ce qui nécessite un filtrage.

### II.3.1.2 Modélisation du filtre de tension redressée :

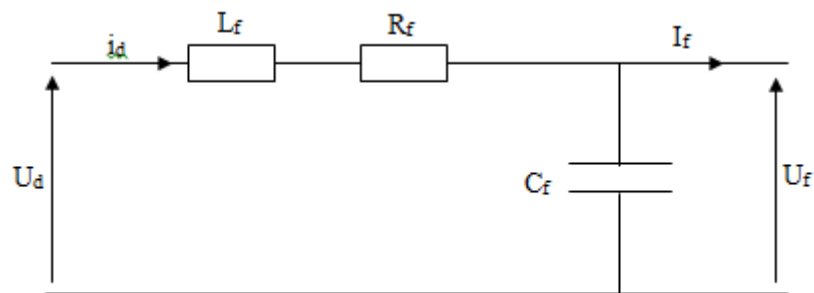


Figure (II.9): Filtre L-C

Pour filtrer la tension continue délivrée par le pont redresseur on utilise un filtre (L-C), Le rôle essentiel de ce filtre peut être résumé dans les points suivants :

- ✓ Il assure la fourniture du courant sous basse impédance et transitoirement le stockage des impulsions renvoyées par l'onduleur et empêche qu'ils ne soient injectés dans le réseau d'alimentation.
- ✓ Il évite les fluctuations importantes de la tension continue d'alimentation délivrée par le redresseur (filtrage des harmoniques de la tension redressée).
- ✓ Il limite la vitesse de croissance des courants de court-circuit. En freinant, grâce à l'inductance. L'apport d'énergie extérieur en cas de «rate» de commutation de l'onduleur.

Les grandeurs qui interviennent pour fixer le dimensionnement du filtre sont :

- la tension  $U_f$  d'alimentation de l'onduleur.
- La composante continue du courant exigé  $I_f$ .
- L'ondulation maximale de ce courant est celle tolérée sur la tension  $U_f$  dans les plus mauvaises conditions.

Afin de réduire le taux d'ondulation de cette tension redressée, on utilise un filtre passe bas (LC), caractérisé par les équations différentielles suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} [v_d(t) - E(t)] \\ \frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{C} [i_d(t) - i_f(t)] \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

Pour dimensionner ce filtre, on doit tout simplement placer sa fréquence de coupure au-dessous de la fréquence de la première harmonique de  $V_{red}(t)$ .

### II.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative. L'utilisation des Onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs Triphasés, les alimentations de secours...etc.

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
  - onduleurs de tension,
  - onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.),
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes à roue libre assurent la protection des transistors [Sak 12, ZSA15].

Donc pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $S(a, b, c) = 1$  Interrupteur du demi bras haut (a, b ou c) fermé.
- $S(a, b, c) = 0$  Interrupteur du demi bras bas (a, b ou c) ouvert.

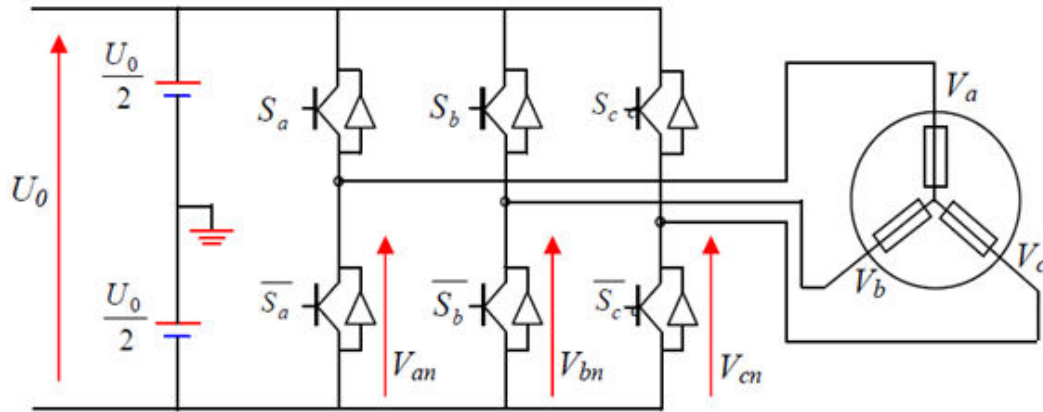


Figure II.10 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

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 et couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions simples on a :

$$\begin{cases} V_{an} = S_a U_0 - \frac{U_0}{2} \\ V_{bn} = S_b U_0 - \frac{U_0}{2} \\ V_{cn} = S_c U_0 - \frac{U_0}{2} \end{cases} \quad (\text{II } 32)$$

Sachant que la charge équilibrée et le neutre isolé, on écrit alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II } 33)$$

En utilisant ces variables booléennes de l'état des interrupteurs, on écrit :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_0}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_b = \frac{U_0}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_c = \frac{U_0}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II } 34)$$

### II.3.3 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle) :

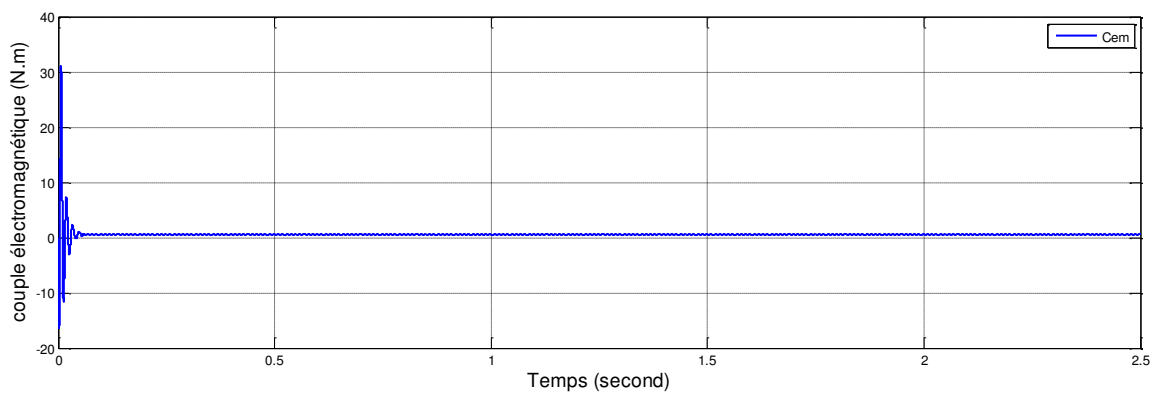
L'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont 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 [BEN09, CHE 05, KHO09].

## II.4 Résultats et discussion

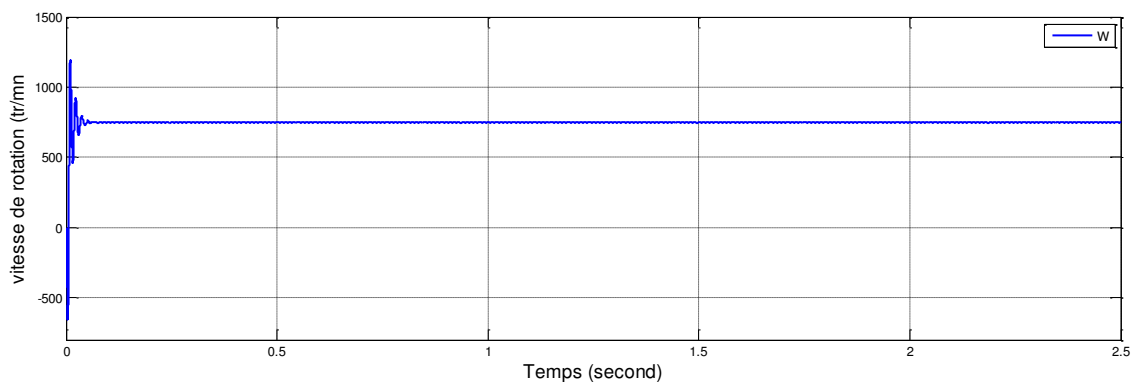
Une fois le modèle de la machine est établi. On peut aborder l'aspect lié à la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, ce qui offre la possibilité d'observer le comportement du moteur sous différents états, sain et défectueux (court-circuit entre spires au stator).

Les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents utilisée en simulation sont donnés en annexe. Les résultats issus de la simulation dans ces cas sont les suivants :

### II.4.1 Alimentation par le réseau sans défaut (MSAP saine)



(a)



(b)

Figure II.11 : couple électromagnétique(a) et vitesse de rotation(b) à vide

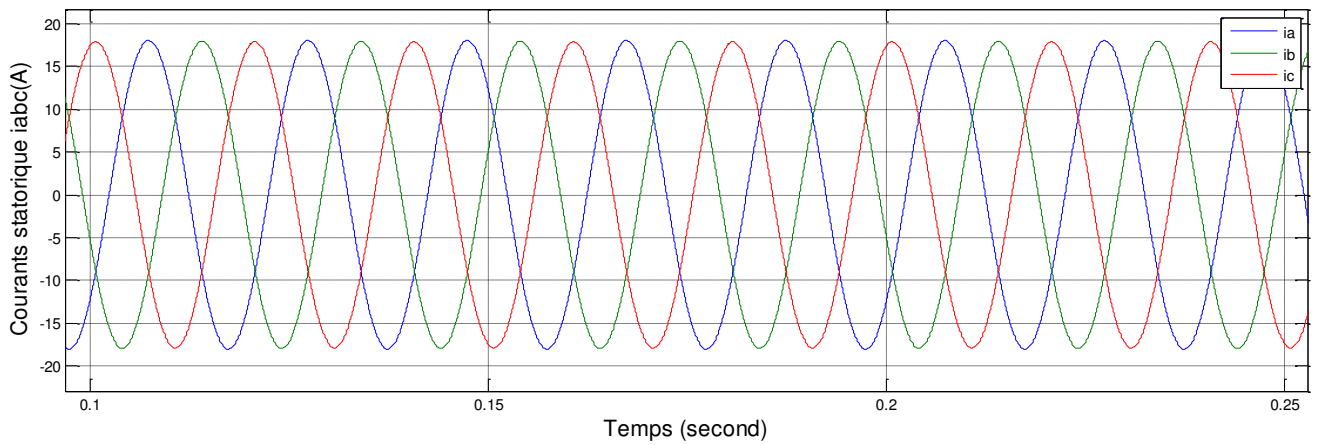
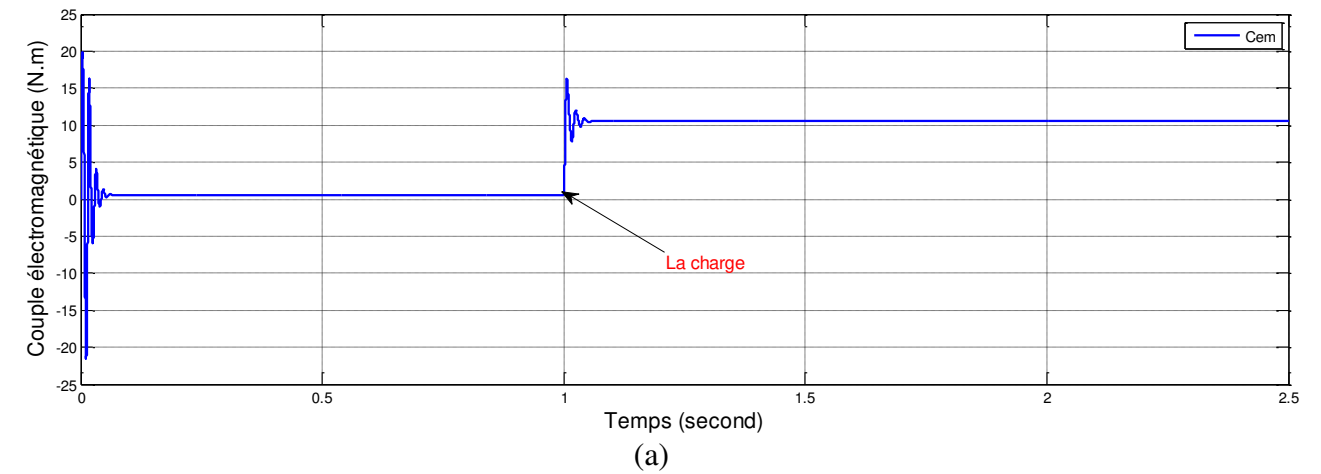
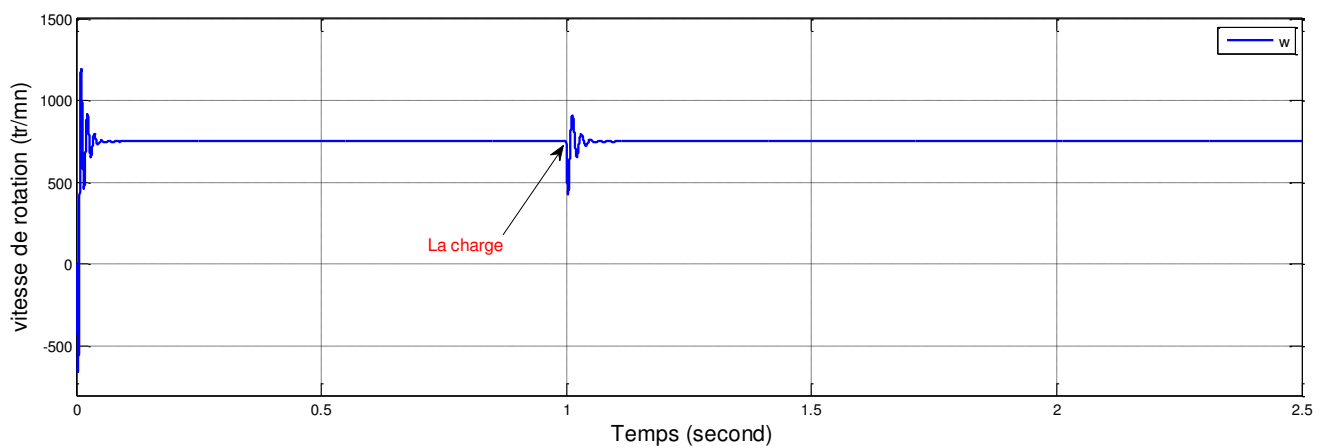


Figure II.12 : Courants statorique pour fonctionnement à vide



(a)



(b)

Figure II.13 : Couple électromagnétique (a) et vitesse de rotation(b) pour une application d'une charge de 10N.m à  $t=1$ s

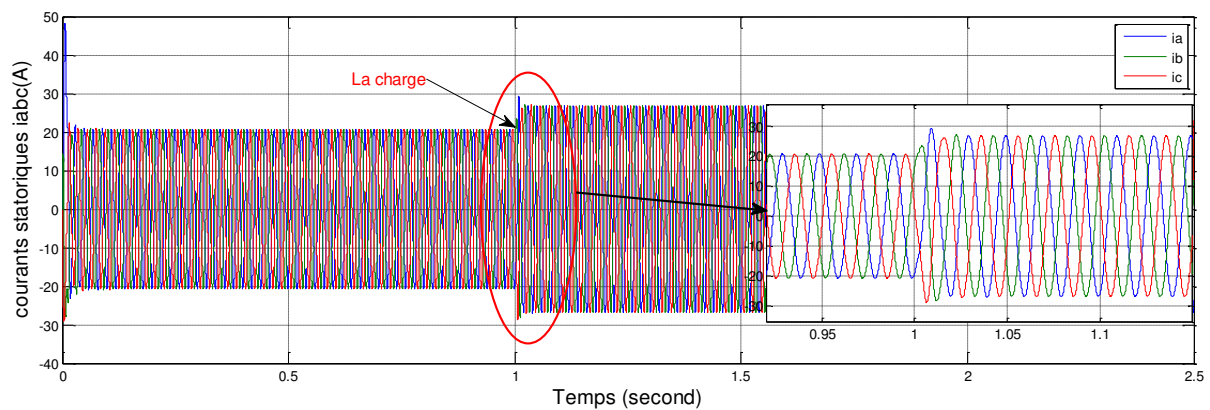


Figure II.14 : Evolution des courants statoriques à vide puis avec application d'une charge de 10N.m à  $t=1s$

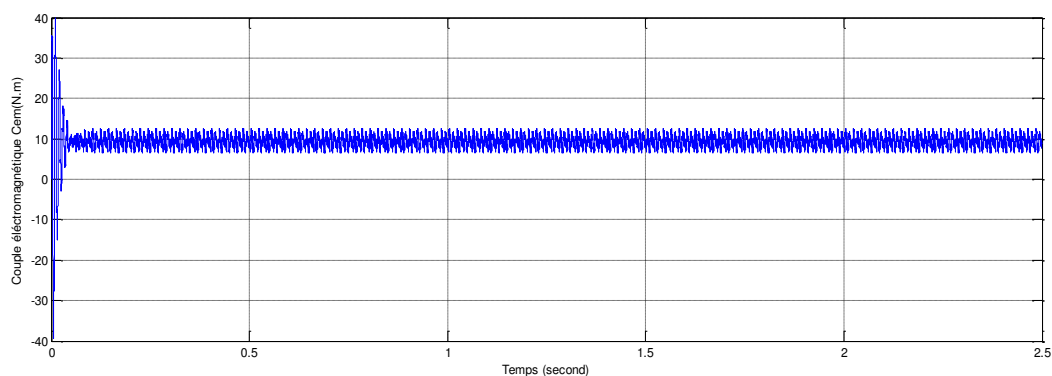
Pour simuler le comportement des grandeurs électriques et mécaniques de la MSAP, on démarre la machine à vide puis on insère un couple de charge, à  $t=1s$ .

En fonctionnement à vide de la MSAP, on note un appel excessif du courant lors de la mise sous tension du moteur en régime transitoire qui se stabilise pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

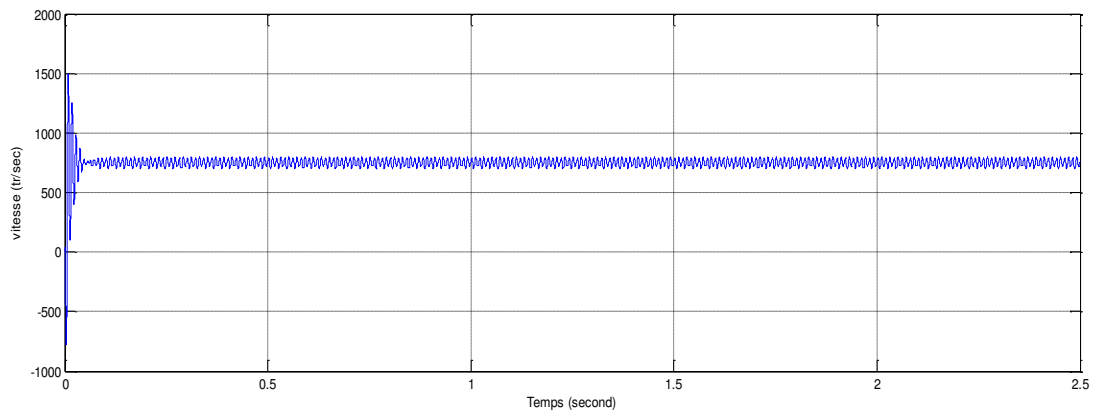
Pour l'allure de la vitesse, on remarque des valeurs négatives et positives, à cause des masses tournante de la machine, on remarque aussi des oscillations dans le régime transitoire jusqu'à se stabilise au régime permanent à une valeur fixe.

En charge, une perturbation du couple ( $C_r = 10Nm$ ), est appliquée à l'arbre de la machine (à  $t = 1s$ ). Le couple électromagnétique se stabilise finalement à la valeur du couple de charge, évidemment on observe une perturbation de la vitesse de rotation.

#### II.4.2 Alimentation par un onduleur de tension (MSAP saine)



(a)



(b)

Figure II.15 Couple électromagnétique (a) et la vitesse de rotation (b) pour une application d'une charge de 10N.m à t=0s

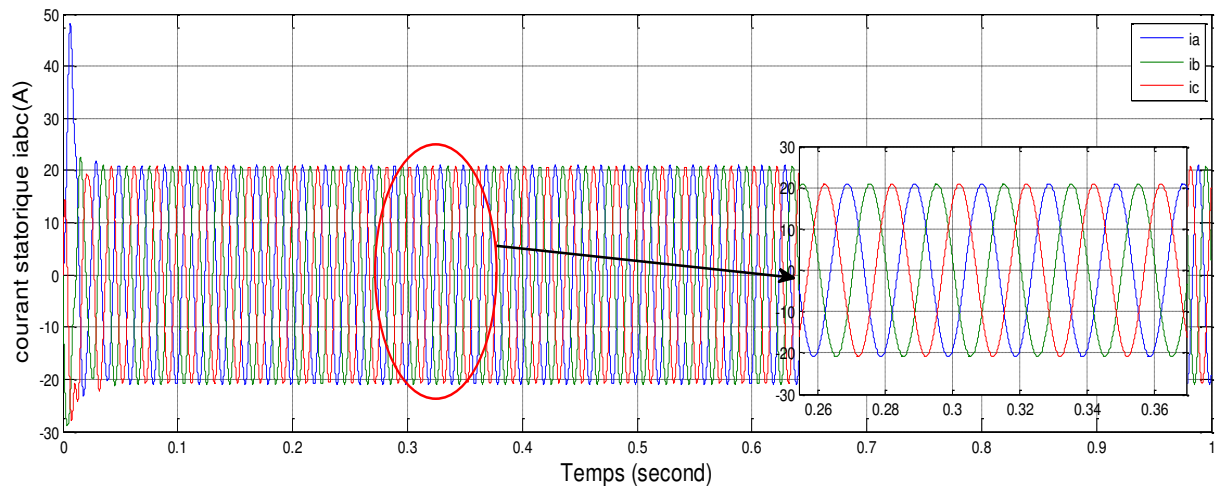


Figure II.16 Evolution des courants statoriques des phases (abc) lors de fonctionnement en charge de la MSAP (saine)  $C_r=10\text{N.m}$  à t=0s

Les figures (II.15, 16) représentent les allures des grandeurs électriques et mécaniques de la machine alimentée par un onduleur à MLI sinusoïdale à l'état sain. L'analyse de la figure montre:

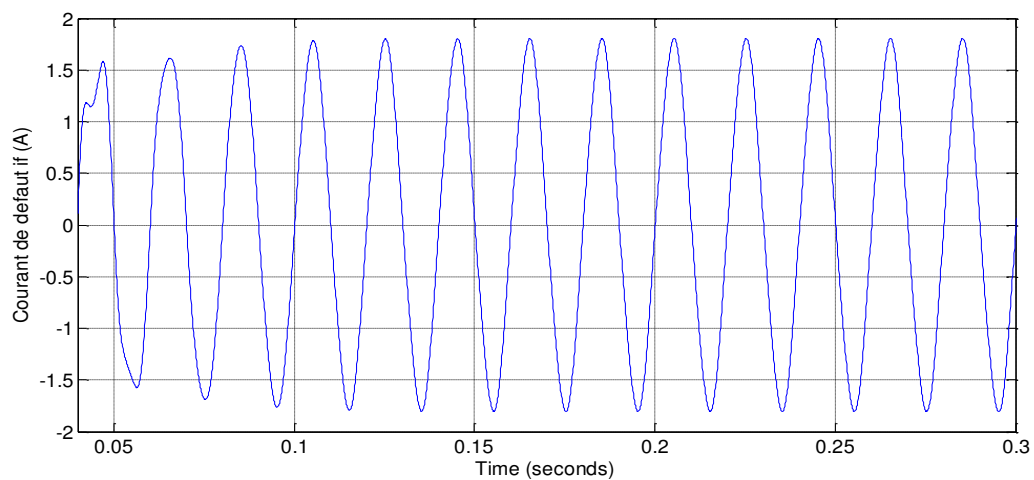
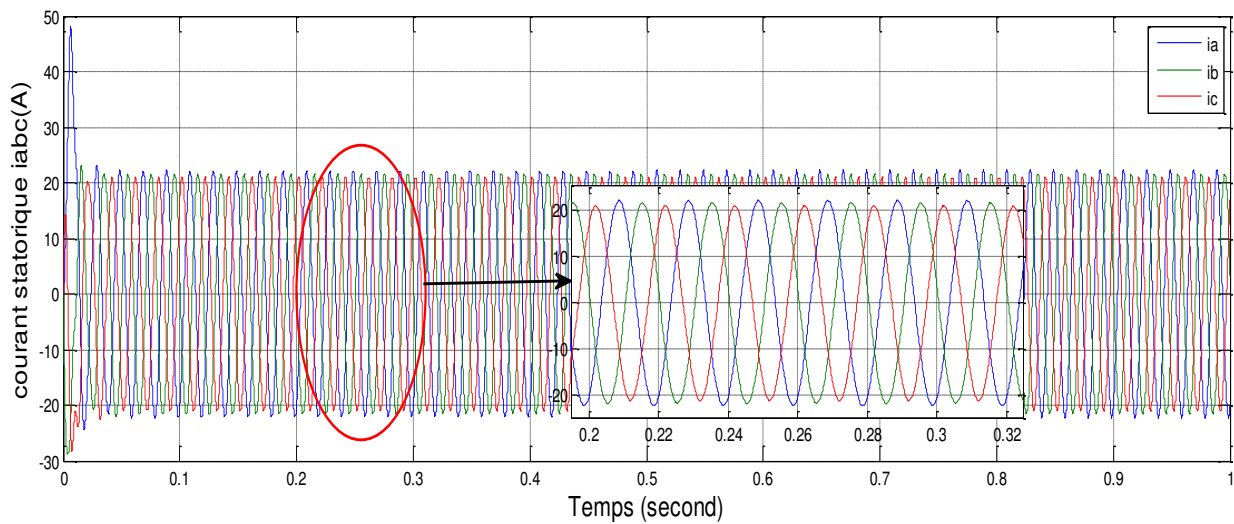
- La présence des ondulations provoquées par l'onduleur affectant les courants statoriques figure (II.16), le couple électromagnétique figures (II.15, a) et la vitesse de rotation figure (II.15, b)
- Au régime permanent, les ondulations sont en relation avec la fréquence de découpage de la MLI (fréquence de la porteuse).

#### II.4.3 Résultats de simulation de la MSAP avec défaut

### II.4.3.1 Influence du changement de la résistance de défaut « rf » sur la machine

Le modèle que nous avons développé pour le défaut de court-circuit entre-spires a été mis en œuvre dans le logiciel Matlab/Simulink®. Ce défaut a été initialisé par le contrôle de la résistance  $r_f$  du modèle proposé. Le cas sain est représenté par une résistance de grande valeur, par contre le court-circuit se traduit par une faible valeur de  $r_f$ .

Nous avons simulé donc le cas où la phase « a » est le siège d'un court-circuit mettant en jeu 50% ( $\mu=0.5$ ) de ses spires pour trois valeurs de résistance de défaut  $r_f = 10 \Omega$  et  $r_f = 1 \Omega$  et  $r_f = 0.1 \Omega$  avec l'application d'un couple de charge de 10 N.m à  $t=0s$ .



(a)

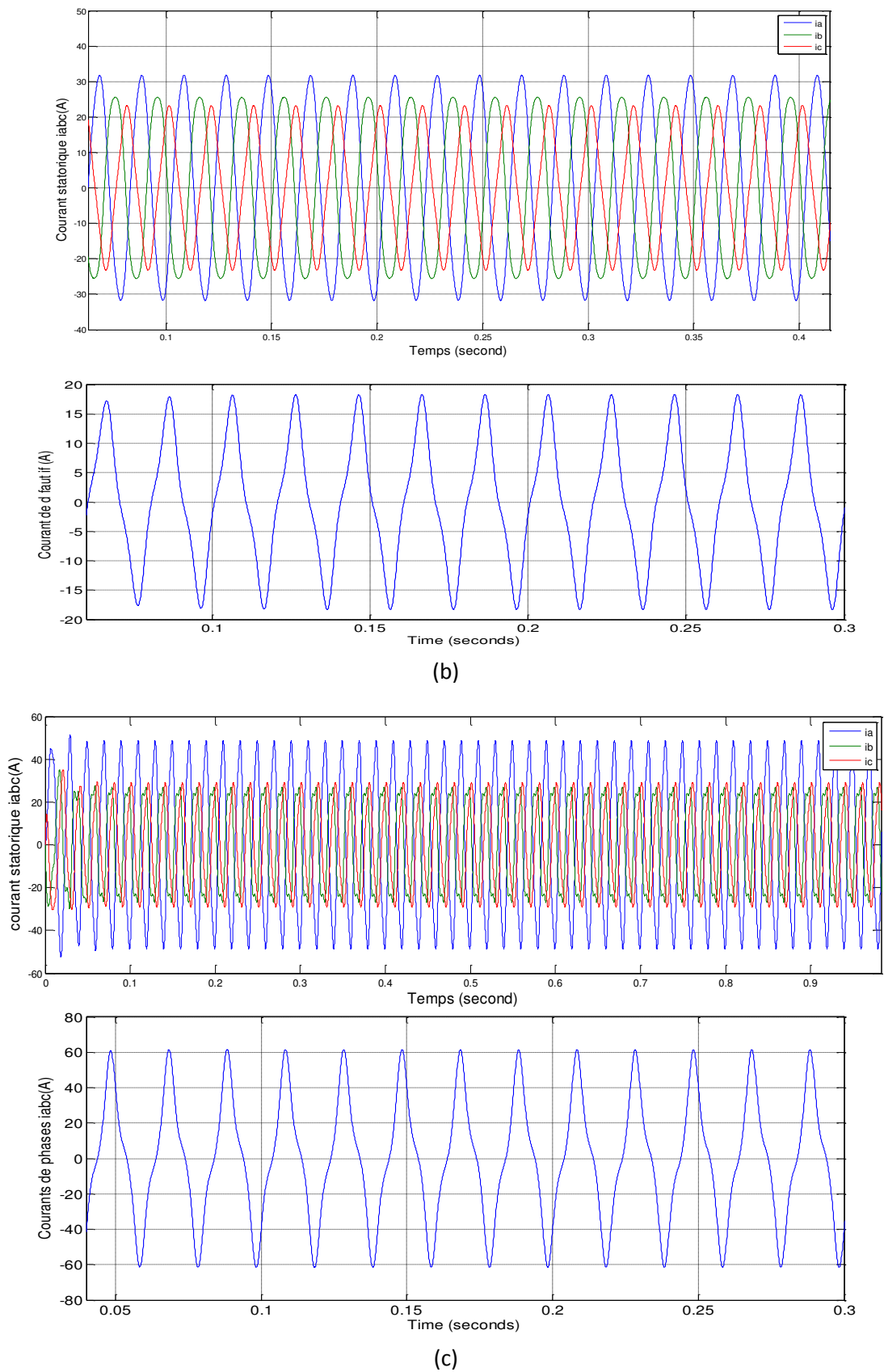


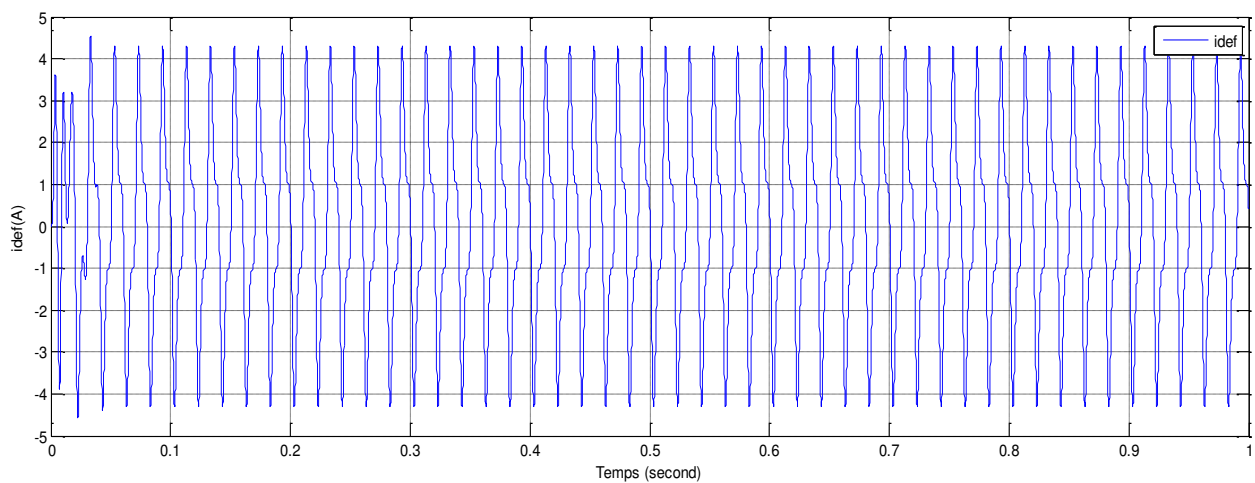
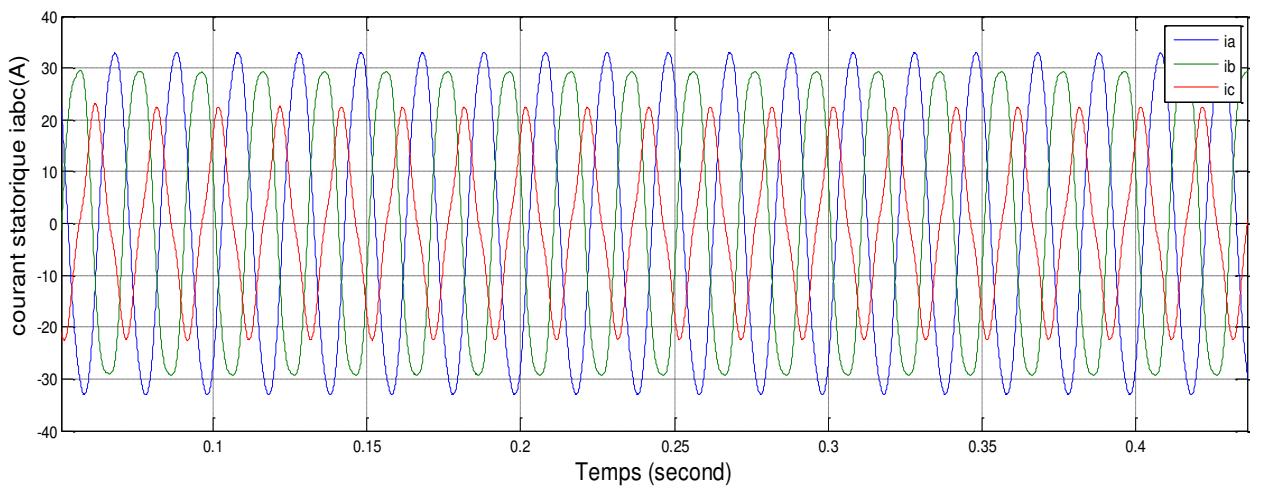
Figure II.17 : Courants de phase et courants de défaut pour  $\mu=50\%$  avec variation de la résistance de défaut (a) :  $r_f = 10 \Omega$  et, (b) :  $r_f = 1\Omega$  et, (c) :  $r_f = 0.1\Omega$

Les formes d'ondes obtenues sont présentées sur la figure(II.17) et elles concernent les courants dans les trois phases (ia, ib, ic) et le courant dans la maille du défaut (if à travers rf). Nous constatons que les courants de phases ne sont plus équilibrés et que les perturbations des courants dépendent de la valeur de la résistance du défaut rf. De même, la forme d'onde du courant if à travers la résistance de défaut (rf) n'est pas parfaitement sinusoïdale.

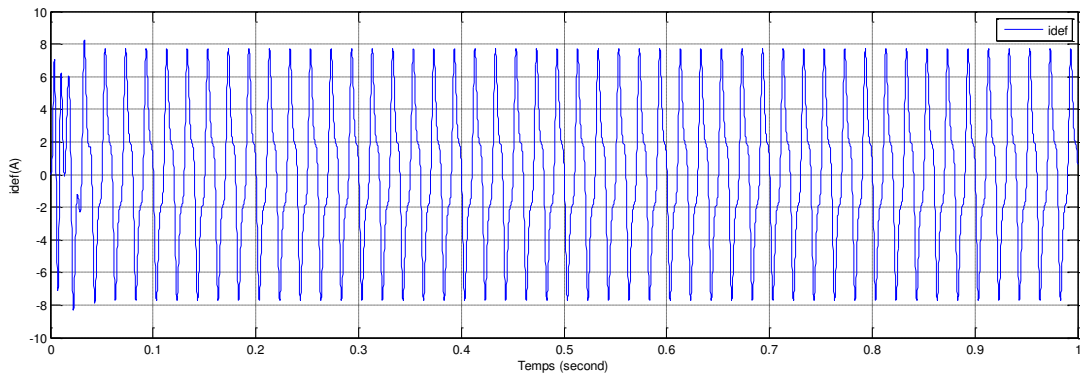
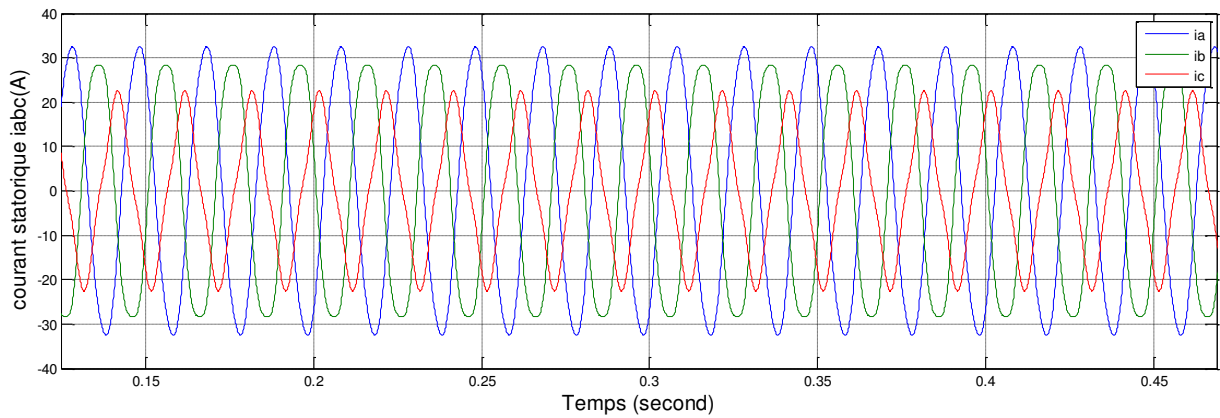
On remarque également que l'amplitude du courant dans la phase en défaut (phase a) est plus élevée que celles des courants des autres phases (phases b, c).

### II.4.3.2 Influence de la gravité du défaut $\mu$ sur la conduite de la machine

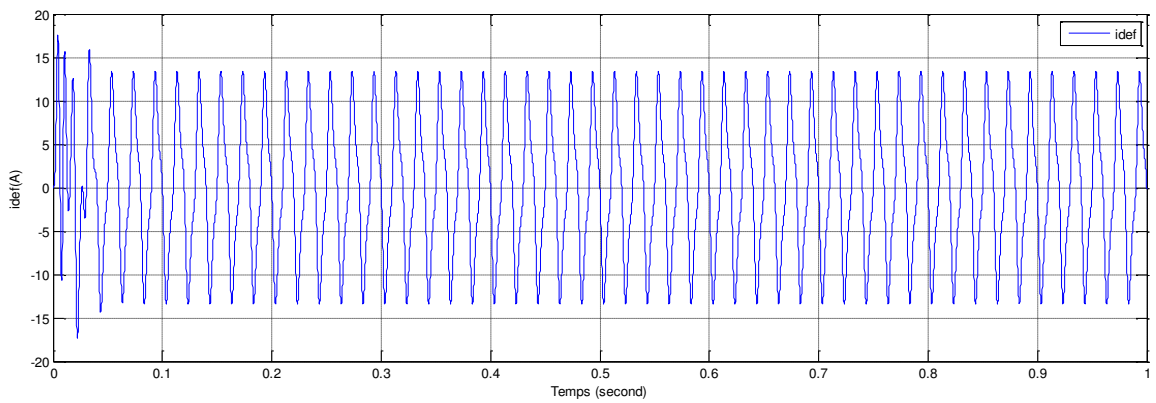
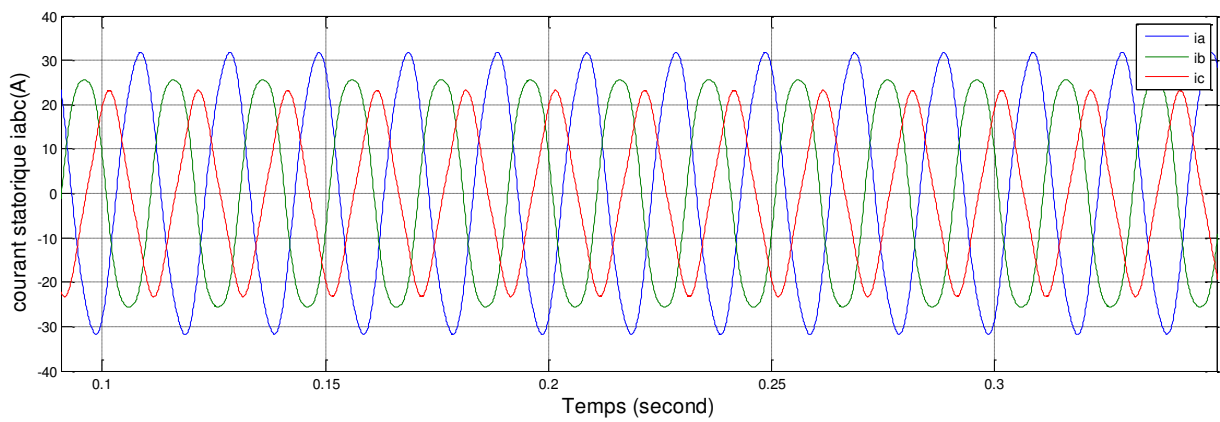
Dans ce cas-là, on fait varier la valeur de  $\mu$  (10%, 20% et 50%) tout prenant en considération que  $r_f=1 \Omega$ , après l'application d'une charge de 10 N.m à  $t=0s$ .



(a)



(b)



(c)

Figure II.18 Courants de phase ( $i_{as}$ ) et courants de défaut ( $i_f$ ) dans  $r_f = 1\Omega$  avec variation de la gravité du défaut  $\mu$ , (a)  $\mu = 10\%$ , (b)  $\mu = 20\%$ , (c)  $\mu = 50\%$

On remarque, que les courants des phases sont déséquilibrés avec en plus d'augmentation de l'amplitude du courant de la phase défectueuse par rapport aux autres phases. Lorsque le nombre des spires en court-circuit augmente, le système des courants des phases est très déséquilibré, bien que ces courants gardent les propriétés périodiques. Le courant de défaut augmente avec le degré de gravité du défaut.

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles de la MSAP pour l'étude de comportement de cette machine saine ou en présence de défauts entre-spires, afin de disposer d'un outil de simulation comportemental fin de la machine en présence de court-circuit dans le stator. L'étude de ce modèle nous a permis d'obtenir une expression théorique du courant dans la mauvaise partie de l'enroulement (courant de défaut). L'étude de cette expression nous a également permis de confirmer qu'il est important de détecter le défaut avant le court-circuit pour réduire le risque d'incendie.

Ce modèle développé de la MSAP est utilisé à la recherche des signatures de défaut de court-circuit ainsi qu'à l'analyse de fonctionnement en présence de défaut.

## **Chapitre III**

# **Analyse du défaut entres-spires de la MSAP par traitement du signal**

## **Chapitre III : Analyse du défaut entres-spires de la MSAP par traitement du signal.**

### **III.1 Introduction**

L'analyse directe des grandeurs temporelles mesurables de la machine synchrone à aimants permanents, ne permet pas la visualisation de l'effet provoqué par un défaut au niveau de la machine, notamment, lorsqu'il s'agit d'un faible défaut de court-circuit entrespires. La détection et la localisation du défaut d'une manière précoce paraît donc délicate.

Cependant, l'analyse dans le domaine fréquentiel des signaux par FFT est utilisée comme un outil de traitement du signal, dans de nombreux appareils dans la vie quotidienne. Par exemple, le contenu fréquentiel du courant d'une phase statorique peut donner des informations pertinentes sur certains défauts mécaniques ou électriques.

Dans ce chapitre, on va essayer d'exploiter les résultats issus du modèle mathématique précédemment développé de la MSAP à l'état sain et en présence de défaut de court-circuit entrespires afin de faciliter la détection et la localisation de ce type défaut.

### **III.2 Différentes méthodes de diagnostic basées sur le traitement du signal**

D'un point de vue historique, le traitement du signal a pour objet la description des signaux liés au monde réel dans un but de traitement, d'identification, de compression, de compréhension ou de transmission.

L'analyse par le traitement du signal, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent.

Les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées en quatre groupes différents : la transformé de Fourier rapide (FFT), La transformation de Fourier à court terme (STFT), l'analyse cepstrale, le spectrogramme, ainsi que la transformée en ondelettes (WT).

Dans cette partie, nous présenterons les méthodes de traitement du signal les plus usuellement utilisées dans le diagnostic des défauts des machines électriques.

### **III.2.1 Analyse spectrale**

Le but de l'utilisation de l'analyse spectral est de déterminer les composantes de fréquence d'un signal numérique ou analogique. L'analyse de Fourier, est impliquée dans un très grand nombre d'application. Entre autres :

- Détermination de spectre du signal en tenant compte de la pertinence des modes de transmission ou de compression,
- Etude de la réponse en fréquence des systèmes,
- La mesure des distorsions harmoniques du dispositif,
- Vérification des structures nécessaires à l'acoustique et des matériaux,
- Diagnostic dans l'analyse des vibrations...etc.

L'analyse spectrale des courants semble être la méthode la plus courante et la plus largement utilisée dans le domine de génie électrique car le spectre résultant représente une source d'informations importante pour la grande majorité des défauts électriques et magnétiques qui peuvent apparaissent dans les machine synchrones à aimants.

#### **III.2.1.1 Rappels sur la transformée de Fourier**

L'objectif de cette section n'est pas de fournir une description détaillée de l'analyse de Fourier et de ses fondements. Il s'agit plutôt de présenter cette méthode d'analyse afin de pouvoir situer l'intérêt de l'analyse en ondelettes.

La transformée de Fourier (TF) est l'un des outils les plus utilisés par la communauté du traitement du signal. Elle permet, en décomposant le signal selon un ensemble de sinusoïdes, de passer du domaine *temps* au domaine *fréquence*.

La transformée de Fourier de  $x(t)$  dans  $L^2$  est donnée par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III. 1})$$

La transformée de Fourier inverse représente  $x(t)$  comme une sommation de sinusoïdes :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} dt \quad (\text{III. 2})$$

L'information fourni par l'intégrale, correspond à tous les instants de temps, puisque l'intégration est de  $-\infty$  à  $+\infty$  sur le temps donc :

- Si le résultat de cette intégration est une grande valeur, alors nous disons que le signal  $x(t)$  a une composante spectral dominante à la fréquence « f ». Ceci signifie que la majorité de ce signal est composée de la fréquence f.
- Si ce résultat de cette intégration est une petite valeur, alors nous disons que le signal  $x(t)$  n'a pas de composante spectral dominante et majoritaire à la fréquence « f ».
- Si ce résultat est nul, alors le signal ne contient pas du tout la fréquence « f ».

La transformée de Fourier discrète (DFT) est l'équivalent discret de la transformation de Fourier continue qui est utilisée pour le traitement du signal analogique. Sa définition mathématique pour un signal  $x(n)$  de N échantillons est la suivante :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad \text{avec } 0 < k < N \quad (\text{III.3})$$

Où  $X(k)$  est l'amplitude à la fréquence k

### **III.2.1.2 La transformé de Fourier rapide (FFT)**

La transformée de Fourier rapide est un algorithme qui permet le calcul de la valeur d'une transformée de Fourier intermittente rapide. L'algorithme est attribué à James W.Cooley et Johan W.Tukey, qui qama développé et publié en 1965. Cette conversion est utilisée pour réduire le bruit et les signaux qui se chevauchent avec une fréquence de filtre passe détailler, puis re-par leur Fourier interface transformer. La détection simultanée des défauts cinétiques, avec FFT, est basée sur l'analyse de signature de courant statique, et est améliorée en réduisant et en séparant les fréquences déformées de la forme actuelle. Il est difficile de faire la distinction entre les conditions d'erreur et les conditions de fonctionnement normales du moteur en utilisant l'analyse de Fourier, car le courant du moteur a un signal instable, dont les caractéristiques varient en fonction des conditions de fonctionnement normales du moteur.

### III.2.1.3 La transformation de Fourier à court terme (STFT)

Pour surmonter certaines limitations de la transformée de Fourier (FFT), quant aux manque d'information sur le temps et traitement de signaux non-stationnaires.

La notion de fenêtre fut introduite pour la première fois par Denis Gabor (1946), cette notion consiste à analyser le signal par transformée de Fourier par portion à l'aide de fenêtres temporelles dont la position centrale est déplacée sur tout le long du signal (figure III.1). La fenêtre est déplacée sur l'échelle des temps par l'incrément désiré par l'utilisateur

L'information tirée peut être plus ou moins pertinente selon l'incrément et la longueur de la fenêtre qui doit atténuer la distorsion des spectres obtenus par la transformée de Fourier. Cette technique est connue sous le nom de la transformation de Fourier à courte terme (STFT). Elle est exprimée mathématiquement par la relation suivante :

$$\text{STFT}\{x(t)\}(a, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g^*(t-a)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.4})$$

Où  $g(t)$  est la fonction fenêtre et  $g^*$  son complexe conjugué.

$a$  représente l'échelle.

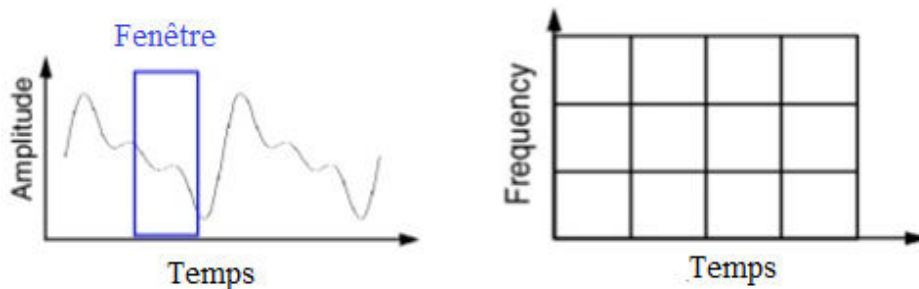


Figure III.1 Transformation de Fourier à court terme (STFT)

### III.2.2 Analyse cepstrale

Cette méthode est utilisée en analyse vibratoire et dans le cas du diagnostic des réducteurs. Il a été prouvé qu'en calculant le cepstre, on identifie clairement la présence des raies.

### III.2.3 Analyse temps-échelle

Cette méthode a été utilisée dans l'analyse pour détecter les phénomènes qui se produisent dans les différentes bandes de fréquences rencontrées dans le signal. Le but de cette méthode est d'analyser le signal à l'aide de fonctions d'analyse spécifiques basées sur des ondes oscillantes et à moyenne nulle. Nous pouvons créer une vague d'analyse centrale de valeur et une plage variable limitée. L'utilisation d'ondelettes pour identifier les défauts et

diagnostiquer les moteurs synchrones est un avantage, car cette technique nous permet d'améliorer l'analyse de courant statique lors des transitions. Grâce à cette fonctionnalité, nous pouvons utiliser des ondes pour l'analyse locale dans la plage de temps ou de temps, car c'est un moyen approprié d'identifier et de diagnostiquer les erreurs pour les appareils électriques lorsque cela est nécessaire dans le domaine des vitesses variables.

### III.3 Analyse spectrale du courant statorique par FFT

Grâce à ce qui a été vu auparavant, il existe de nombreux types de fenêtres qui préfèrent certains aspects aux autres. Il est donc préférable de choisir la fenêtre appropriée en fonction du problème spécifique à résoudre.

Cette caractéristique porte essentiellement sur quatre points :

- La largeur et la hauteur du lobe principale,
- La hauteur du premier lobe secondaire,
- L'atténuation des lobes secondaires,

#### III.3.1 Résultats de simulation

Sur les figures III.2, III.3 et III.4 sont données les courants statoriques des trois phases à l'état sain et avec défaut de court-circuit entre spires de la phase (a) du stator.

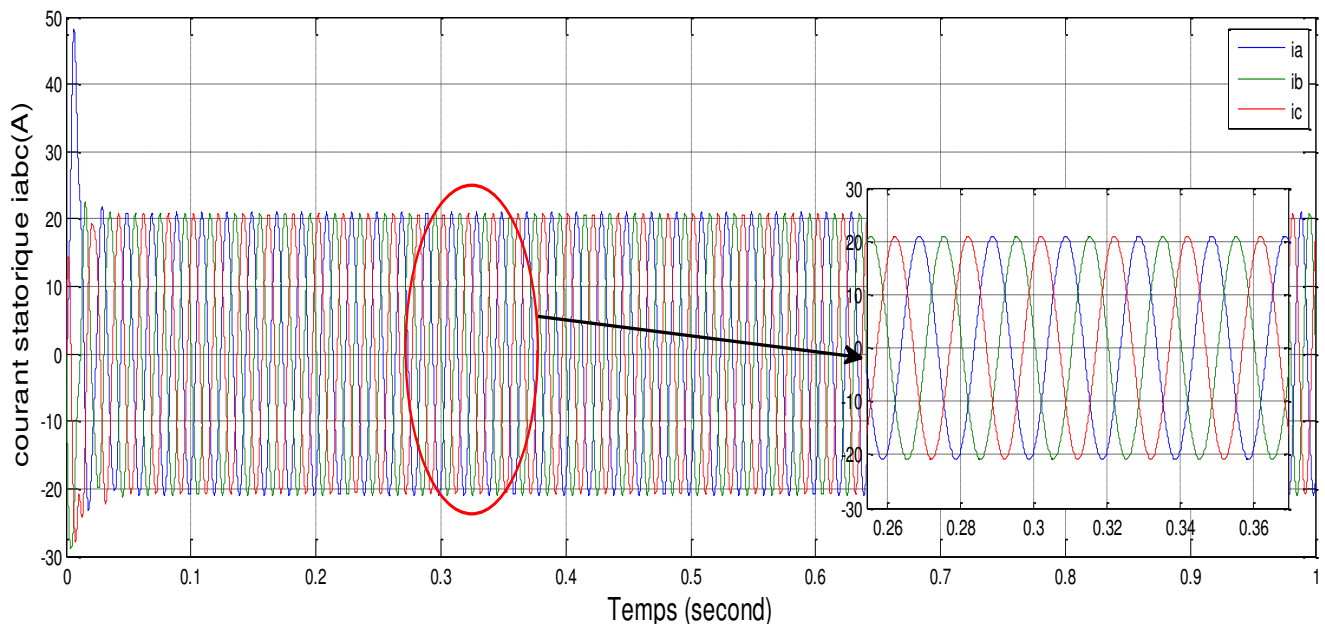


Figure III.2 Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge  $C_r=10\text{N.m}$  à  $t=0\text{s}$  (Machine à l'état sain)

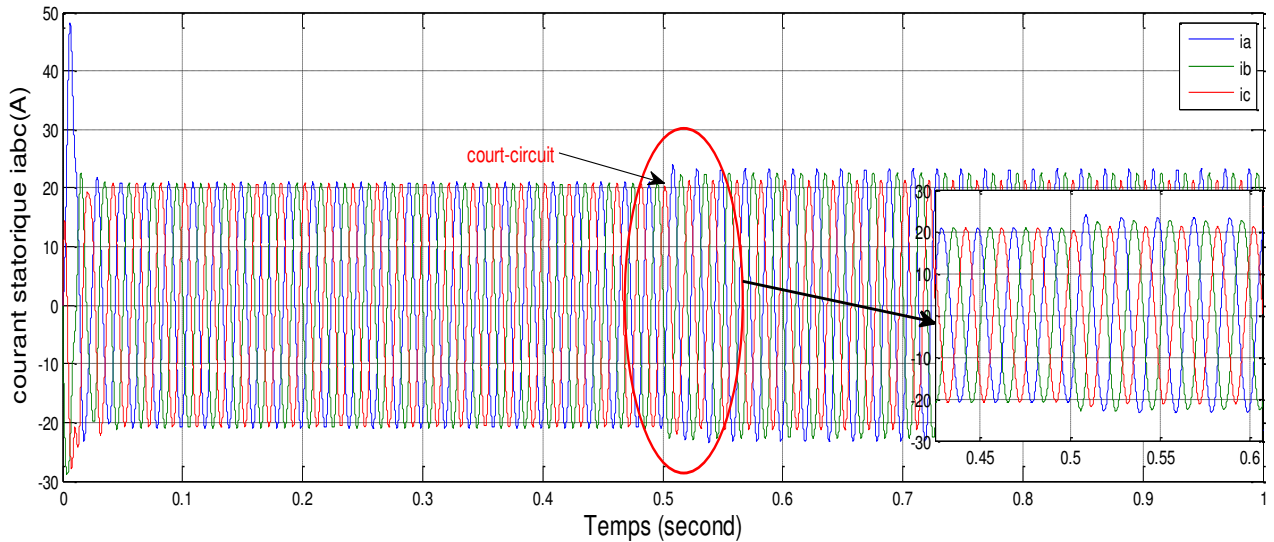


Figure III.3 Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge  $Cr=10N.m$  à  $t=0$  (Machine avec défaut  $\mu= 20\%$  et  $r_f = 5 \Omega$ ,  $t= 0.5s$ )

Les figures (III.2 et III.3) représentent les allures des grandeurs électriques de la MSAP alimentée par un onduleur à MLI sinusoidale à l'état sain et avec défaut.

On constate pour la figure III.2 que les amplitudes des trois courants ( $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ ,  $i_{cs}$ ) sont égales. Mais en ce qui concerne la figure III.3, nous remarquons une légère augmentation dans l'amplitude du courant ( $i_{as}$ ) par rapport aux courants ( $i_{bs}$ ,  $i_{cs}$ ) des deux phases b et c. Cela est dû au défaut de court-circuit entre spires dans la phase (a) qui à provoquer notamment une diminution de la résistance de la phase et par conséquent une augmentation du courant.

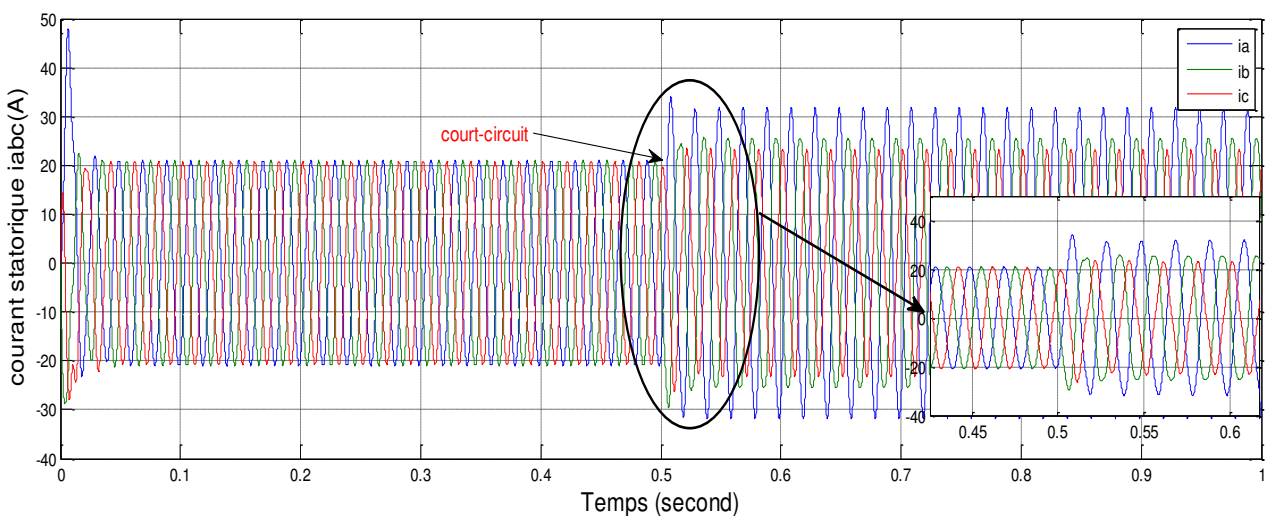


Figure III.4 Evolution des courants de phases statoriques ( $i_{abc}$ ) lors de fonctionnement en charge  $Cr= 10N.m$  à  $t= 0$  (Machine saine et avec défaut  $\mu= 50\%$  et  $r_f= 1 \Omega$ ,  $t= 0.5s$ )

La figure (III.4) représente les trois courants statorique pour un défaut de court-circuit de 50% de spire à l’instant  $t=0.5s$  dans la phase  $as$ . Un déséquilibre se manifeste sous forme d’une augmentation importante au niveau du courant de la phase où s’est produit le défaut et d’une augmentation moins importante pour les deux autres phases

### III.3.2 Cas d’un moteur à l’état sain

La figure (III.5) représente le spectre du courant ( $ias$ ) à l’état sain. On n’observe aucune raie latérale autour de la fondamentale 50 Hz.

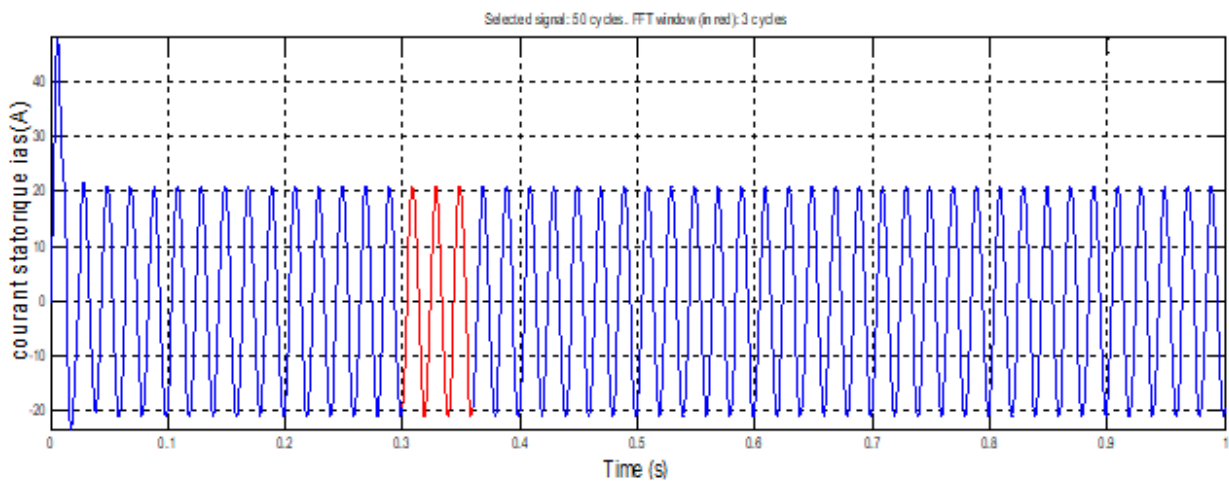


Figure III.5 : Evolution temporelle du courant de phase statorique ( $ias$ ) à l’état sain

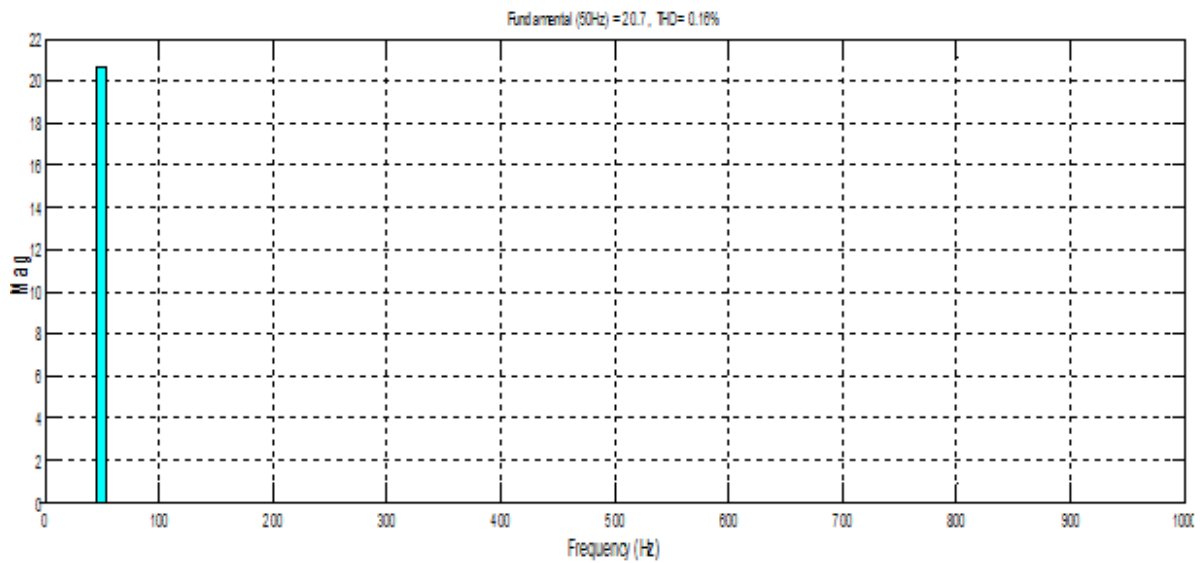
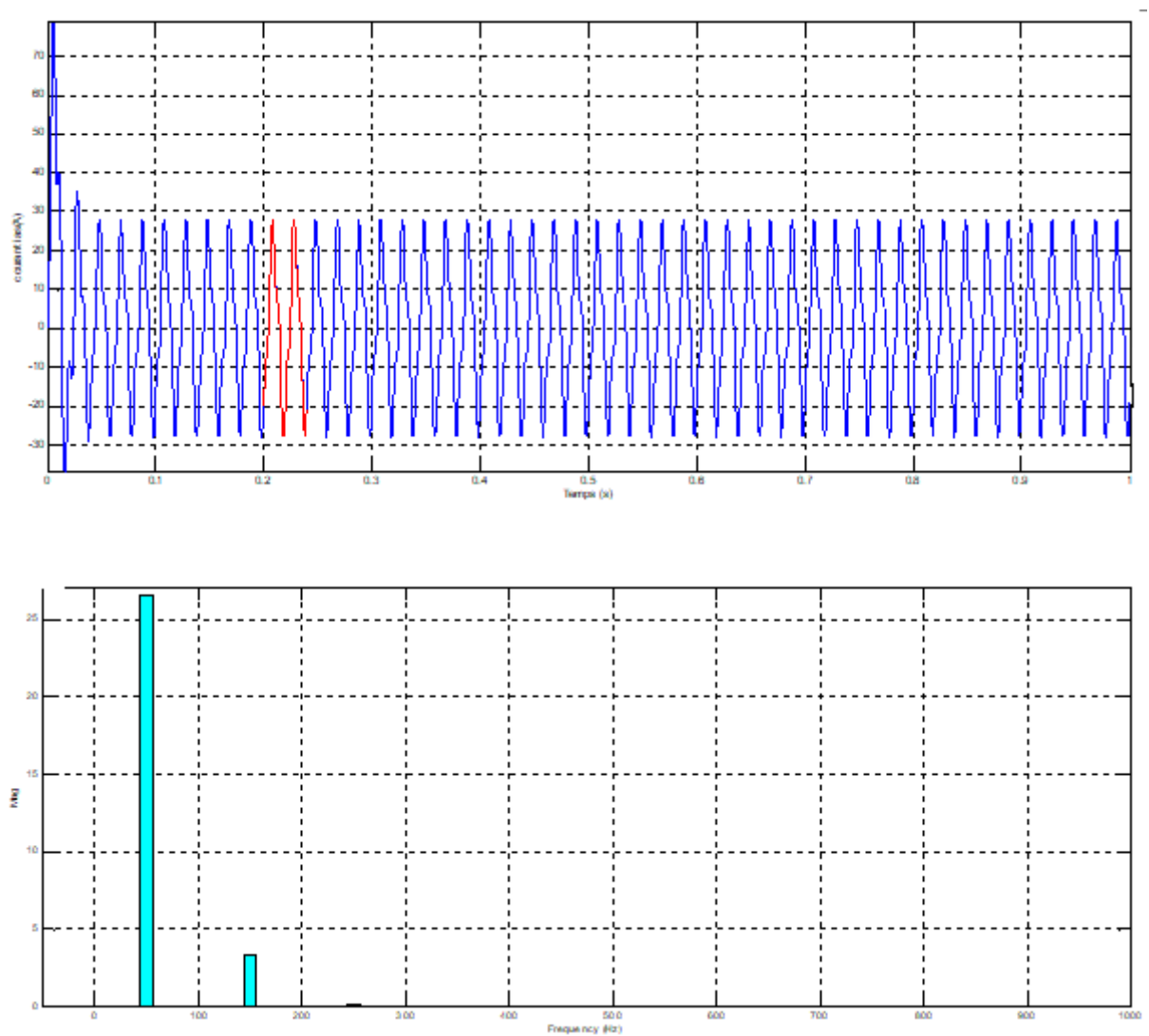


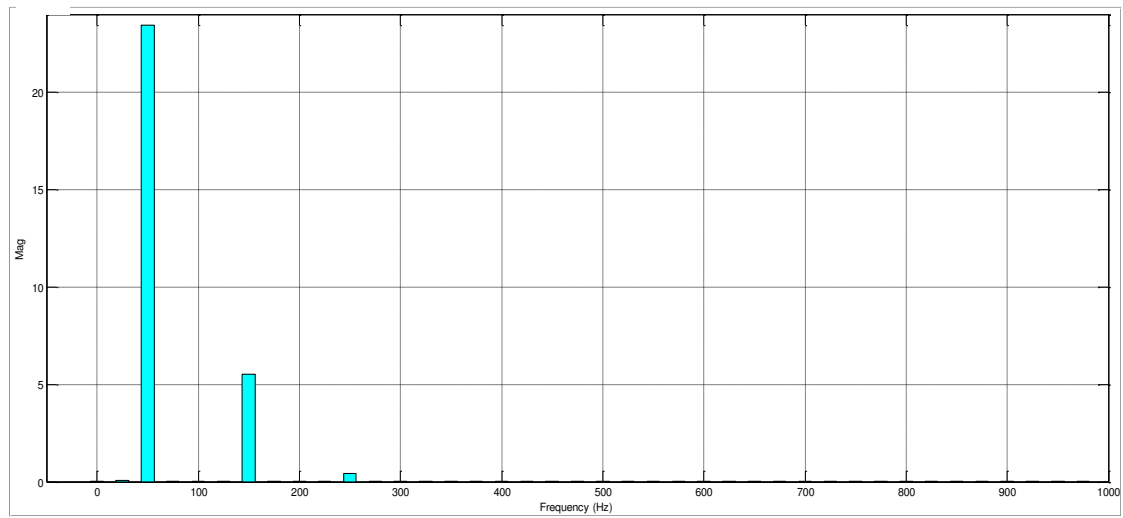
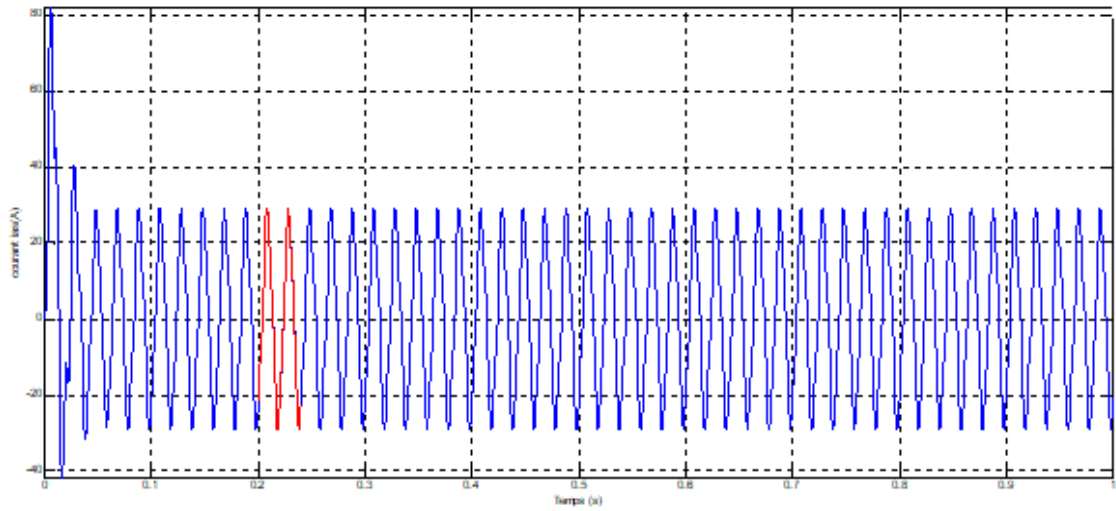
Figure III.6 : Spectre du courant de phase ( $ias$ ) à l’état sain (Alimentation par un réseau triphasé)

### III.3.3 Cas d'un moteur avec défaut de court-circuit entres spires

Dans ces simulations nous allons à présent étudier le comportement de la machine en présence d'un défaut pour deux valeurs du taux de nombre de spires en défaut  $\mu = [25\% \text{ et } 50\%]$ . Etant donné que le nombre de spires par bobine élémentaire (par paire de pôles) est de 40 et le nombre total de spires par phase 160 ( $p=4$ ), les valeurs de  $\mu$  choisies correspondent aux cas où 40, et 80 spires sont respectivement en défaut de court-circuit. La figure (III.7) représente les spectres du courant  $i_{as}$  dans le de défaut de court-circuit entre spires (respectivement 25% et 50%) à  $t=0s$ .

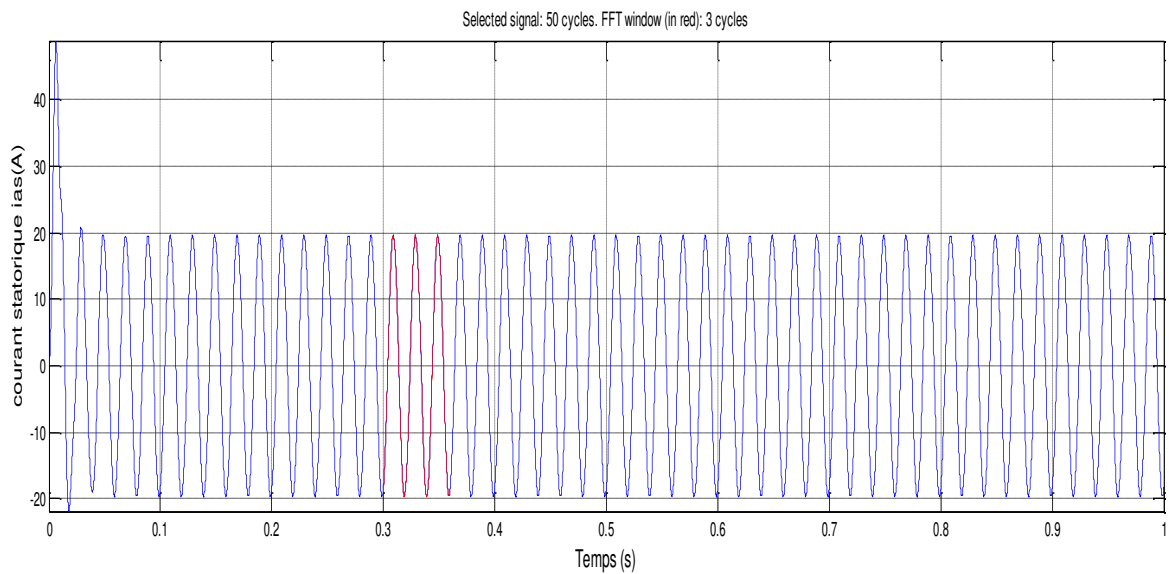


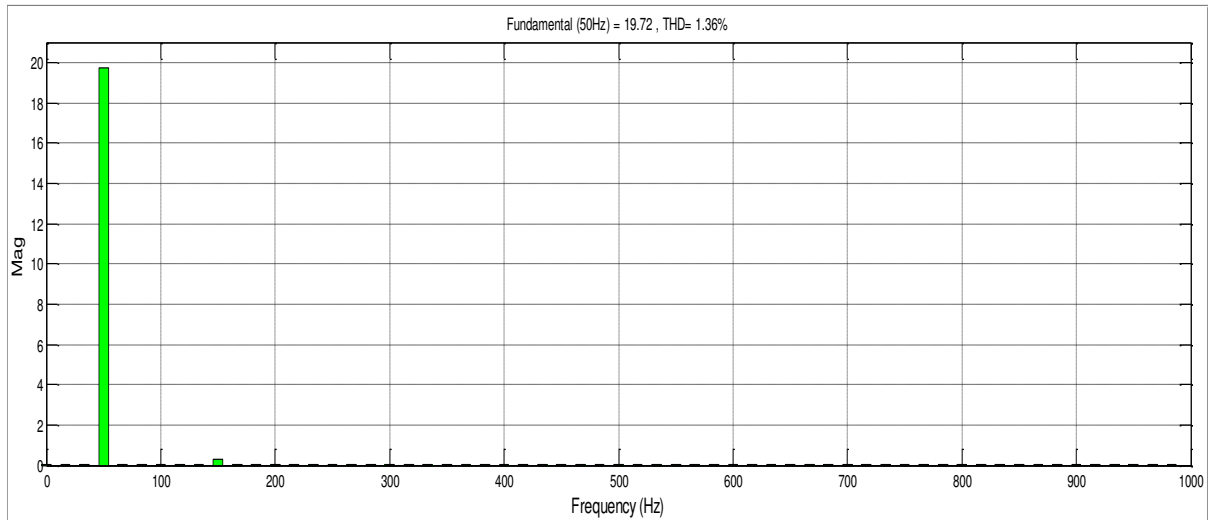
(a)



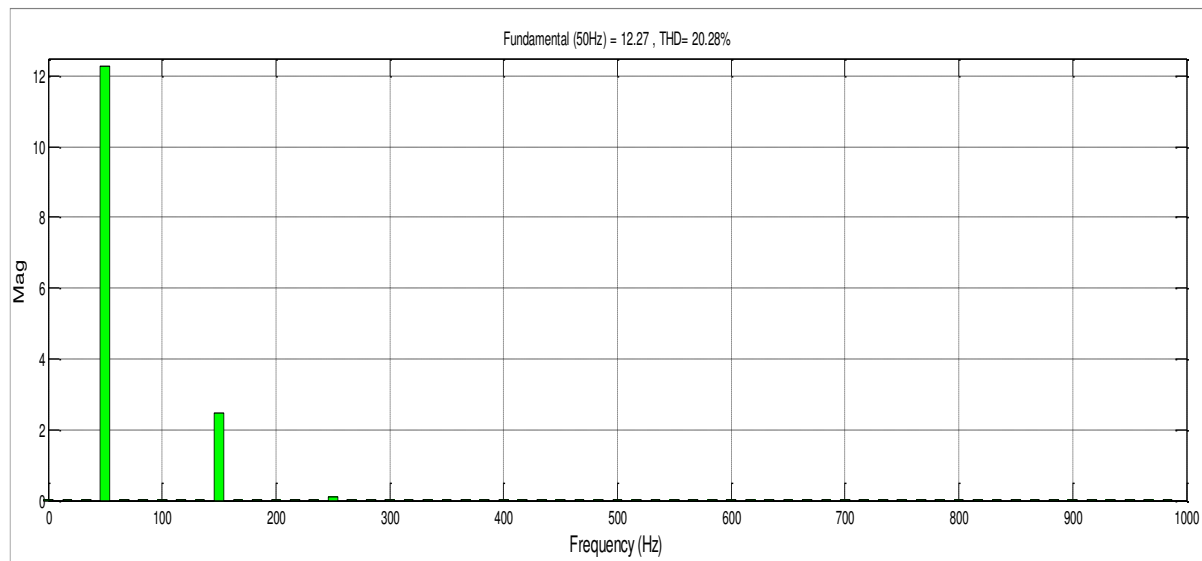
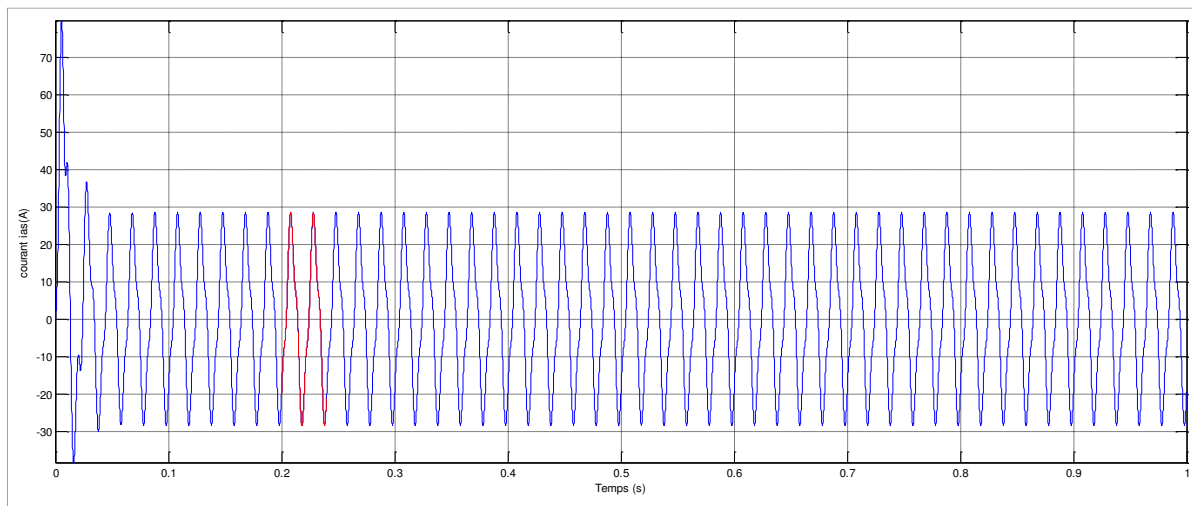
(b)

Figure III.7 : Spectre du courant de la phase as pour une machine en défaut court-circuit entre spires ; a : (25%) et b : (50%)





(a)



(b)

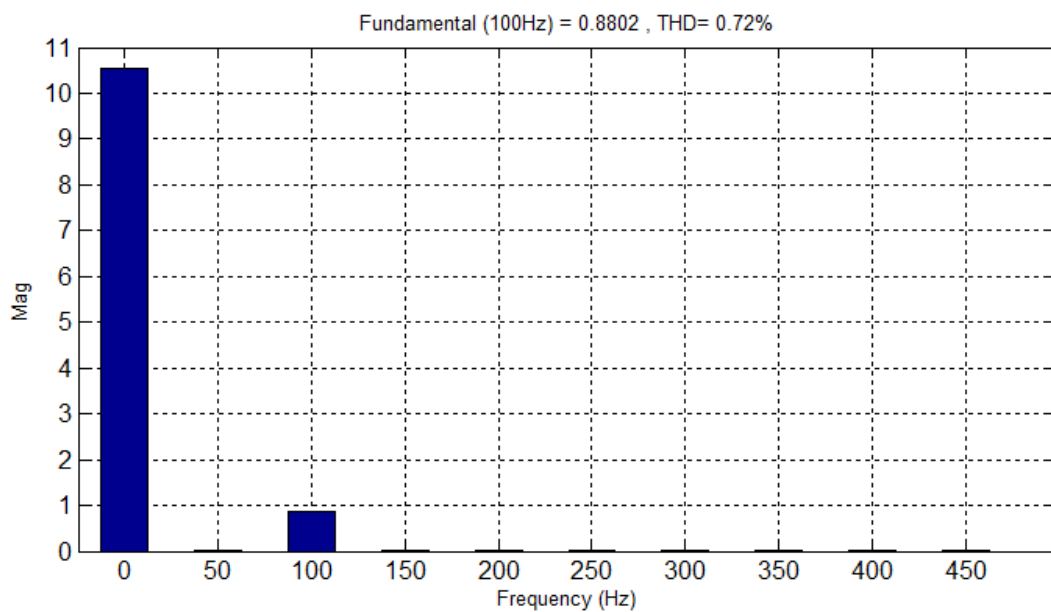
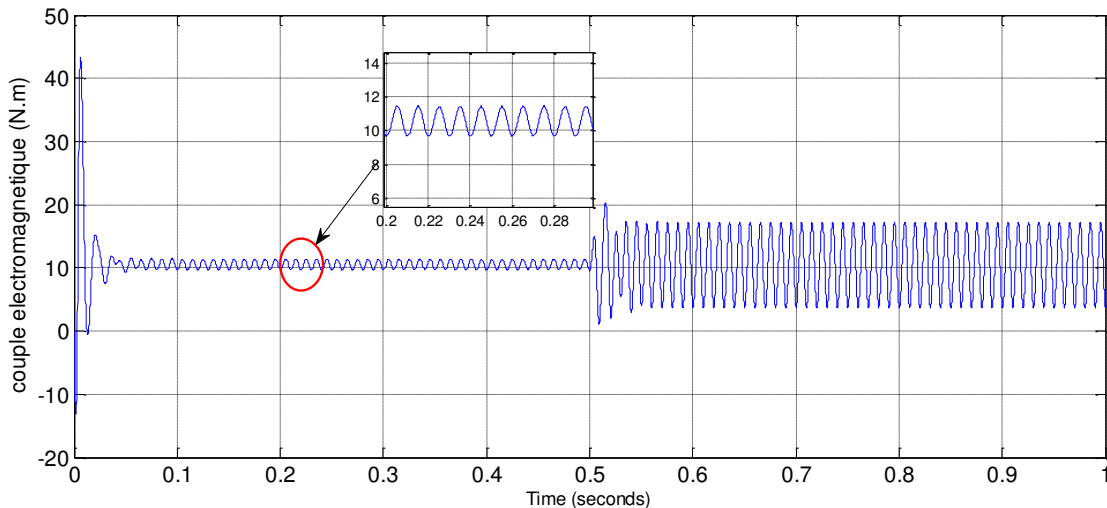
Figure III.8 : Spectre du courant de la phase ias pour une machine en défaut de court-circuit entre spires avec variation de  $r_f$  ; (a)  $r_f=10\Omega$  et (b)  $r_f=1\Omega$  et  $\mu= 50\%$ .

Durant le défaut de court-circuit entre spires à la phase  $a_s$  (Figures III.6, 7 et 8), on remarque l'apparition de nouvelles composantes de fréquences visibles dans les spectres au voisinage du fondamentale d'ordre (150Hz et 250Hz) avec des amplitudes différentes.

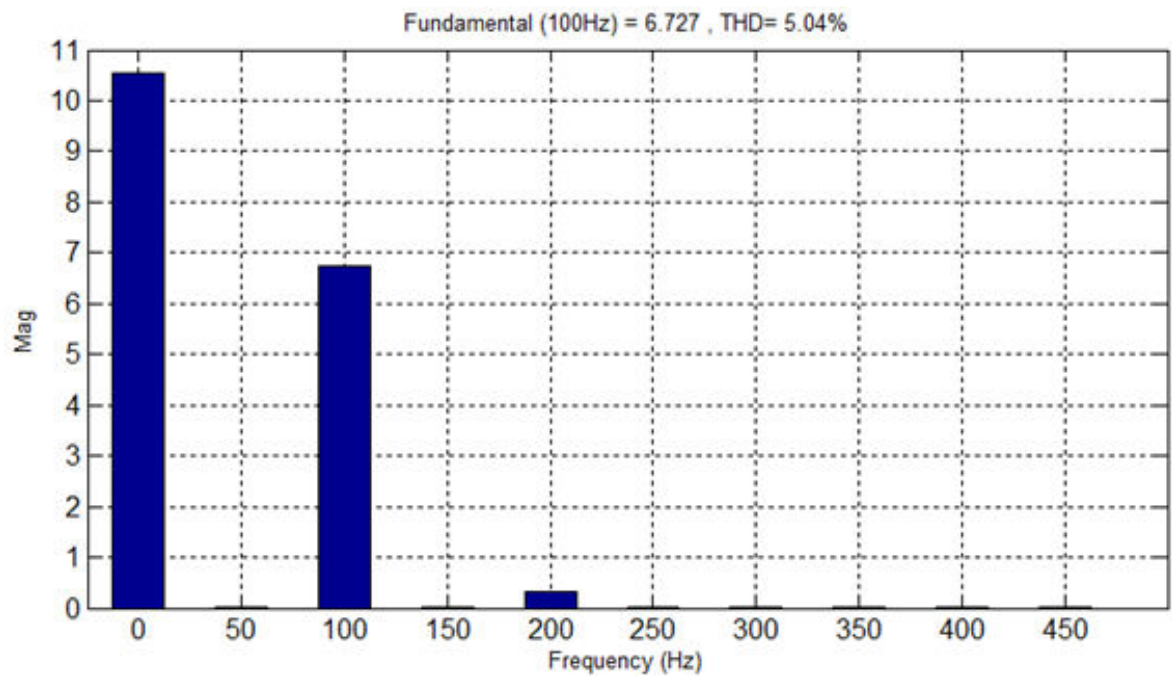
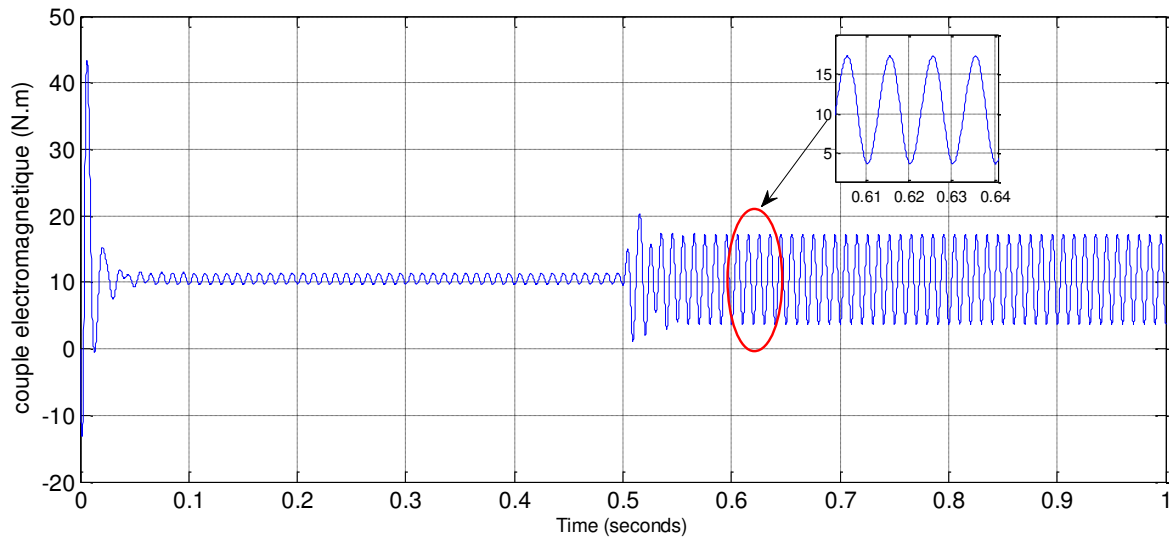
Dans la suite, nous proposons de faire une étude spectrale du courant de défaut  $I_f$ , et du couple électromagnétique afin de mettre en évidence l'effet du défaut sur les composantes harmoniques. Nous traçons les spectres harmoniques pour  $\mu=50\%$  qui sont appliqués après avoir atteint le régime permanent (pour  $r_f=10$  et  $r_f=1$ ). Les figures (III.9, 10 et 11) montrent les résultats de simulation obtenues après le court-circuit.

### III.3.3.1 Analyse spectrale du couple électromagnétique (Machine avec défaut)

Les résultats de la simulation pour le défaut de court-circuit d'une phase sont présentés sur La Figure (III.9) ci-dessous :



(a)



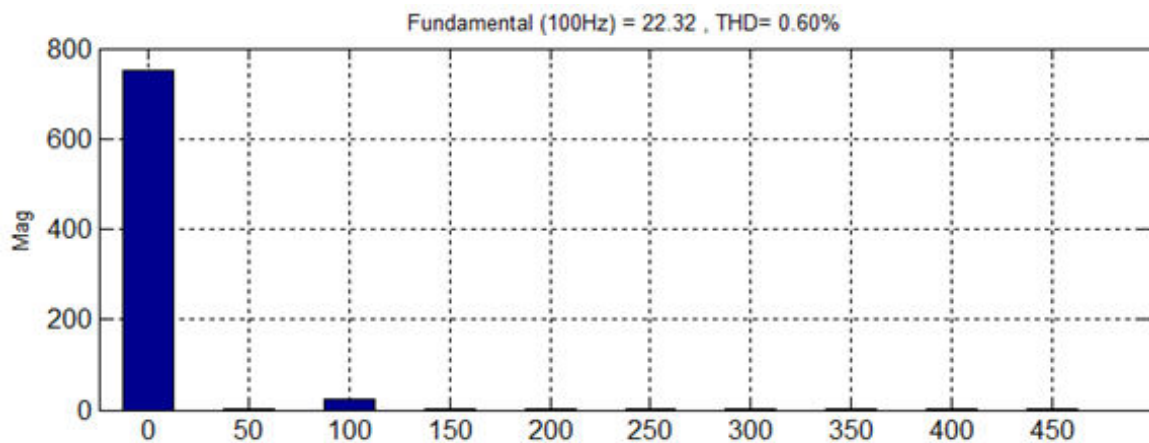
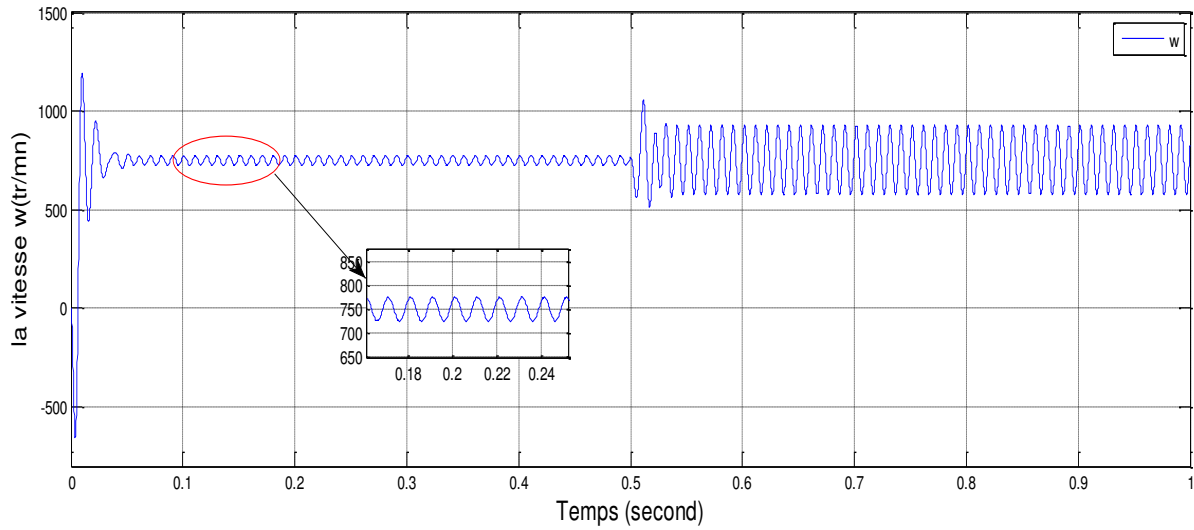
(b)

Figure III.9 : Le couple électromagnétique et son spectre, en charge ( $C_r=10\text{N.m}$  à  $t=0.5\text{s}$ )

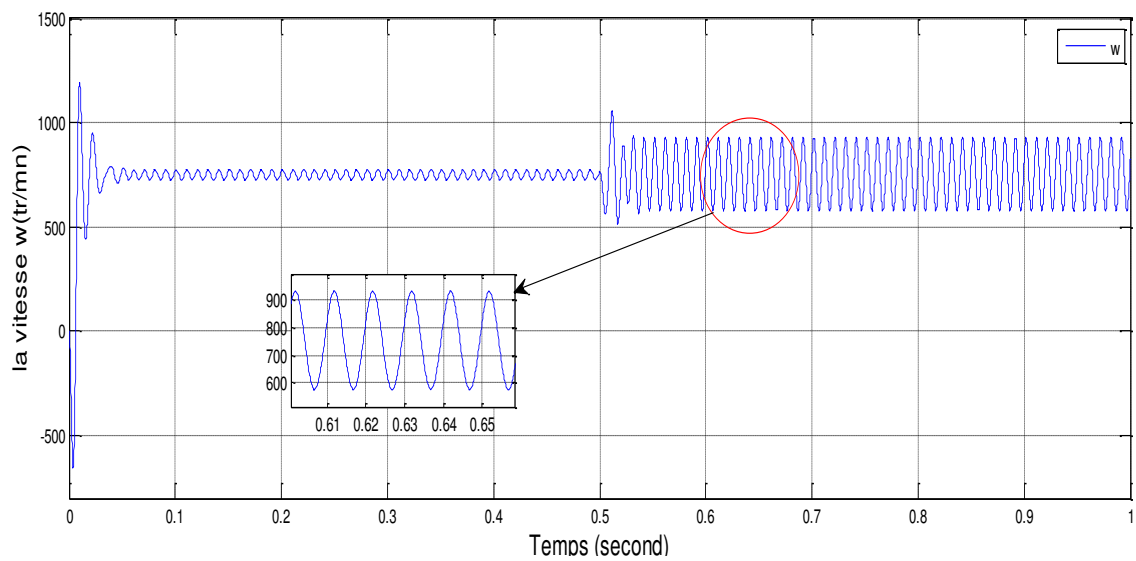
(a)  $r_f=10\Omega$ , entre  $t=0$  et  $0.5\text{s}$  (b)  $r_f=1\Omega$ , à partir de  $t=0.5\text{s}$ .

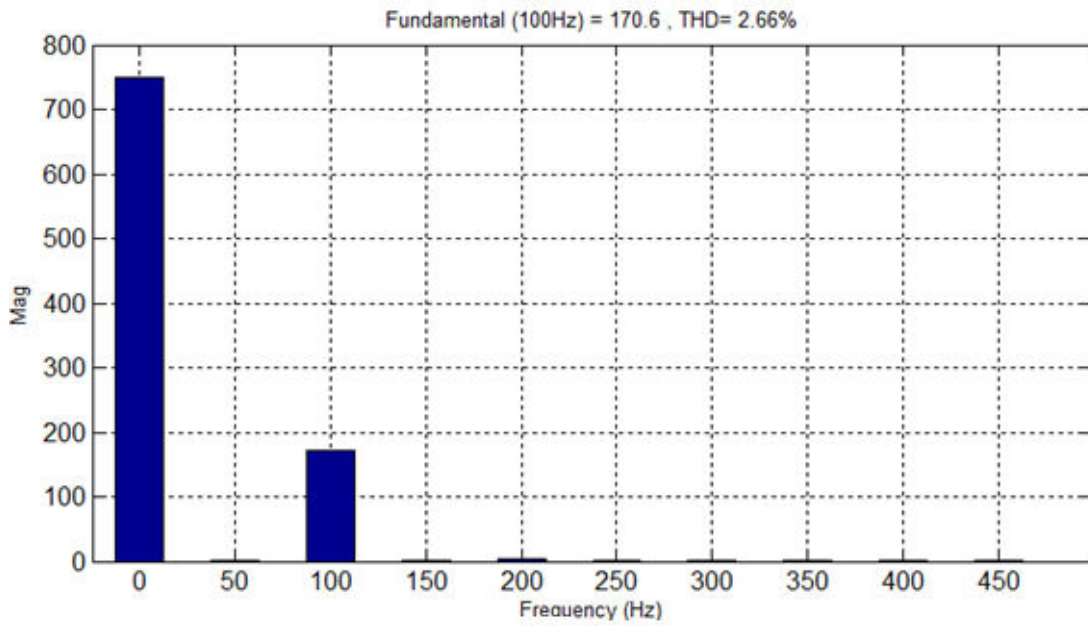
III.3.3.2 Analyse spectrale de la vitesse (Machine avec défaut)

Les résultats de la simulation pour le défaut de court-circuit d'une phase statorique sont présentés sur les figures (III.10-a, b) ci-dessous.



(a)

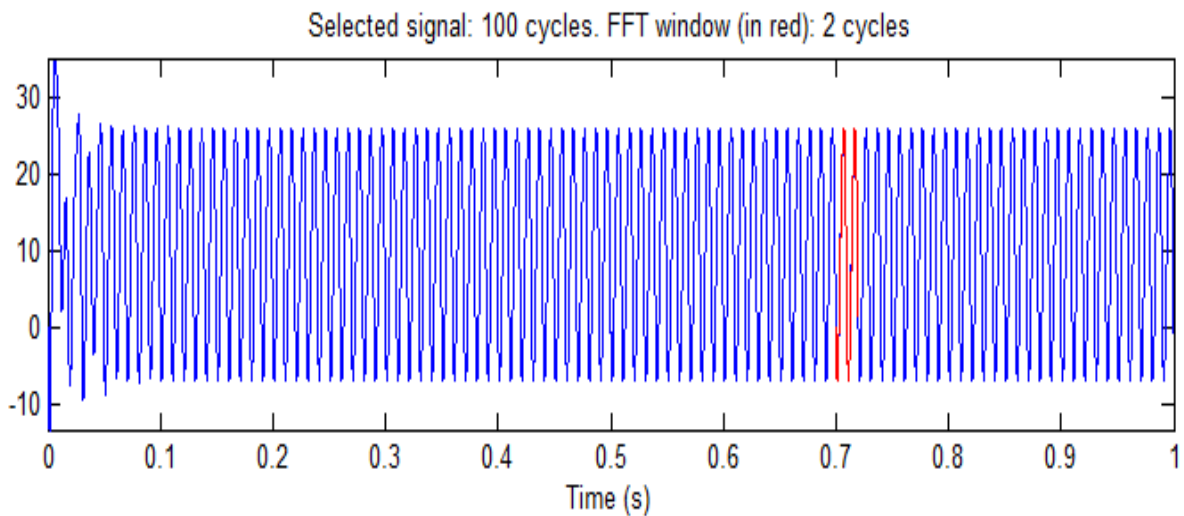




(b)

Figure III.10 : Evolution de la vitesse et son spectre en charge ( $C_r=10N.m$ )  
 (a)  $r_f=10\Omega$ , entre  $t=0$  et  $0.5s$  (b)  $r_f=1\Omega$ , à partir de  $t=0.5s$ .

Les figures (III.9, et 10) montrent que la différence entre un fonctionnement normal et avec un défaut (court-circuit entre spire) d'une phase apparaît sur les amplitudes des spectres de courants statoriques (les raies caractéristiques d'un défaut court-circuit entre spire d'une phase).



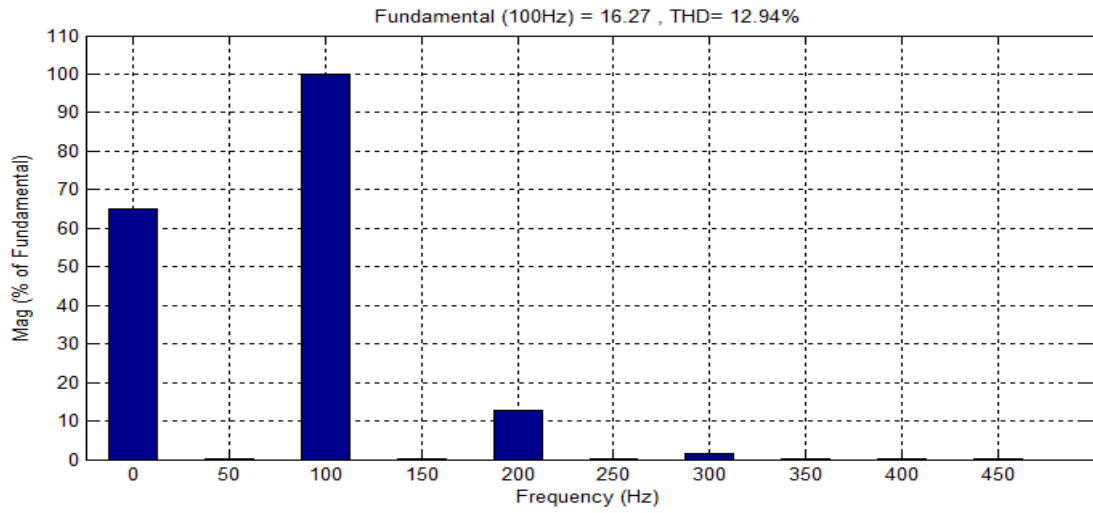


Figure III.11 : Evolution du couple et son spectre : cas où  $r_f=0.1\Omega$  et  $\mu=0.5$

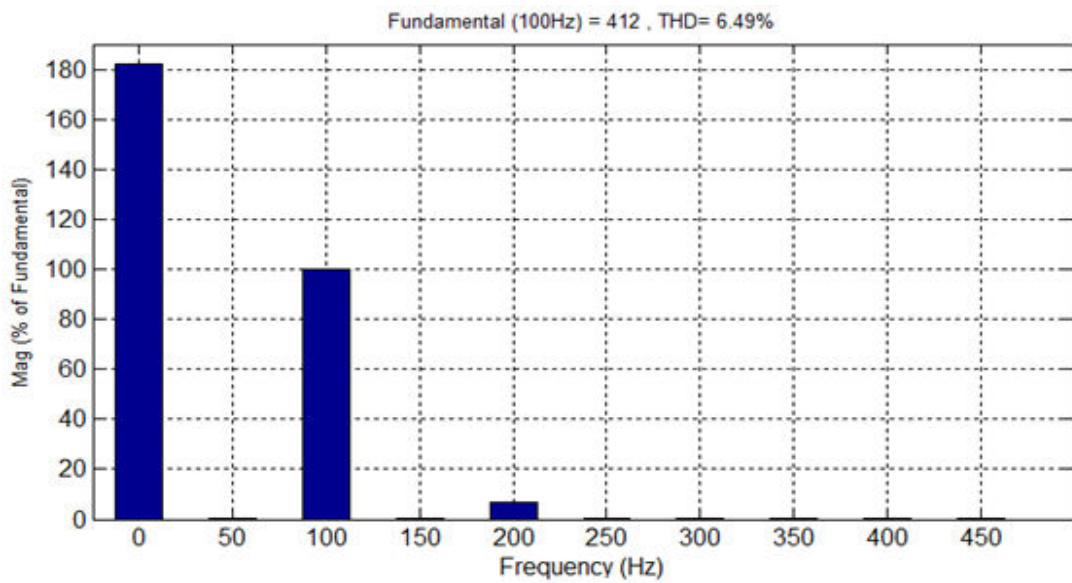
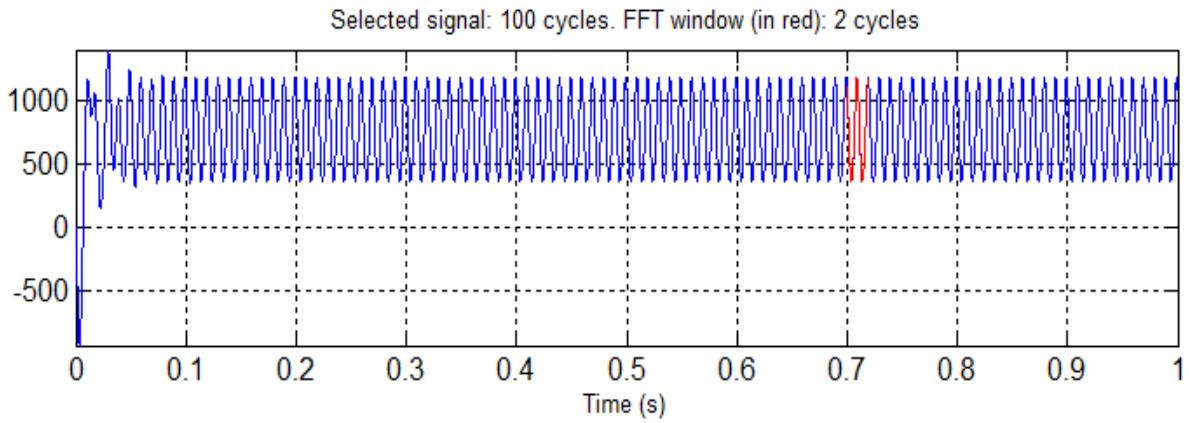


Figure III.12 : Evolution de la vitesse et son spectre cas où :  $r_f=0.1\Omega$  et  $\mu=0.5$

Les résultats de simulation donnés sur les figures III.11 et III.12 montrent qu'un défaut de court-circuit entre spires produit des ondulations de fréquence double (100Hz ,200Hz, 300Hz...) dans le couple et la vitesse.

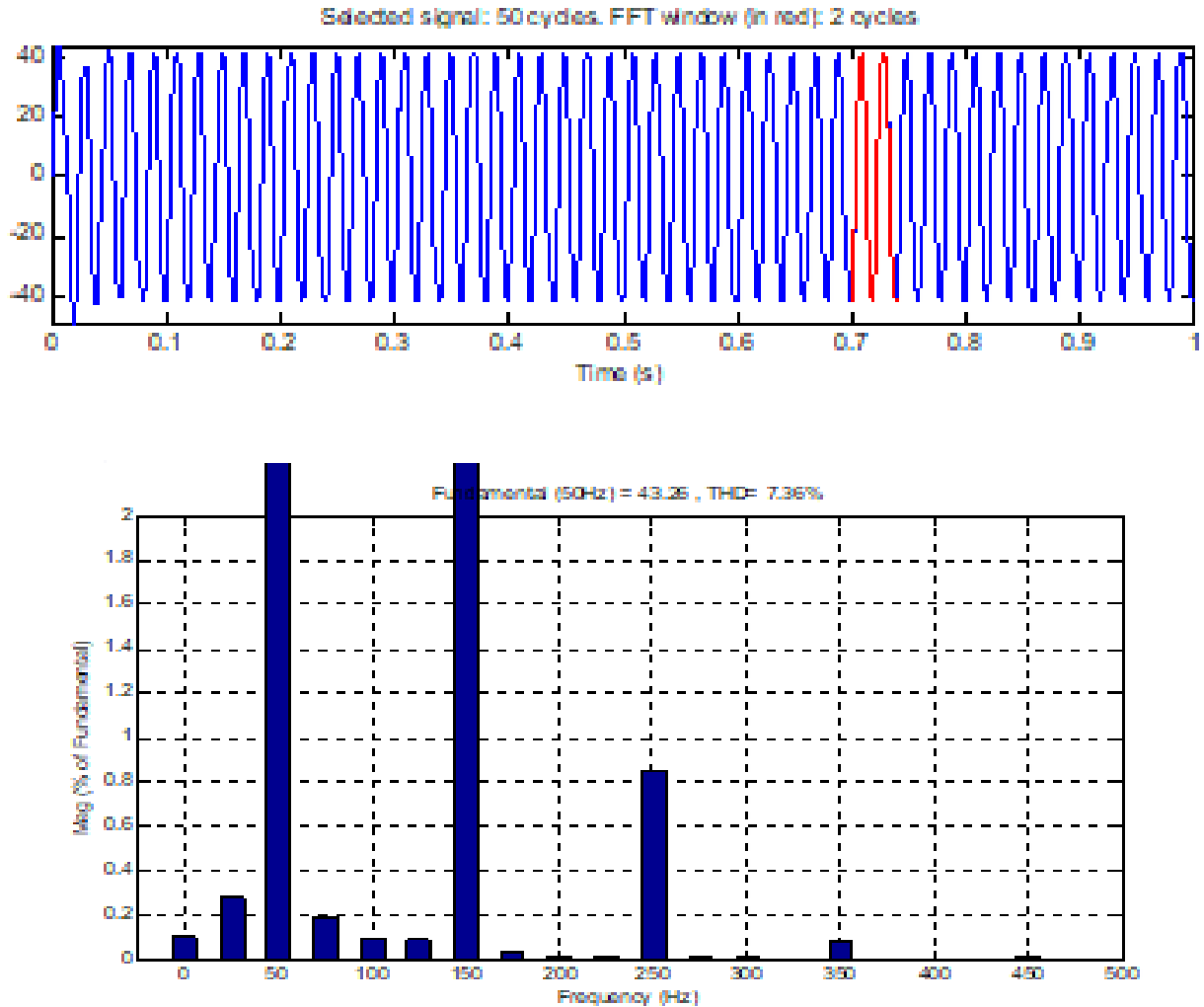


Figure III.13 : Evolution du courant de phase (ia) et son spectre cas où :  $r_f=0.1\Omega$  et  $\mu=0.5$

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu qui inclut les différentes méthodes utilisées pour diagnostiquer et détecter les erreurs qui se produisent dans les machines synchrones, parmi ces méthodes ou méthodes, nous avons mentionné la méthode de spectroscopie ou technique des fenêtres. Cette technique peut être utilisée dans le système de diagnostic des erreurs.

L'analyse spectrale du courant de phase défectueuse a permis d'introduire la transformée de Fourier en déterminant la configuration fréquentielle de ce signal et en

trouvant plus tard les lignes latérales associées aux défauts (150Hz, 250Hz,350Hz...etc.) et les fréquences double 100Hz, 200Hz,300Hz...etc. dans le spectre de la vitesse et du couple.

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu général sur les différentes méthodes de diagnostic de défaut basée sur le traitement du signal dans le domaine fréquentiel et l'analyse temps -échelle. La transforme de Fourier donne l'information sur les fréquences existées dans un signal mais ne permet pas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire fait partie du domaine de la maintenance prédictive des machines électriques notamment les Machine Synchrones à Aimants Permanents(MSAP). Dans le premier chapitre nous avons commencé par une presentation de l'état de l'art portant sur la constitution, principe de fonctionnnemnt des machines synchrones à aimants permanets, et leur domaines d'utilisation. Ensuite, nous avons évoqué les différents défauts qui peuvent apparaitre dans la MSAP suivi des principales techniques de diagnostic souvent utilisées.

Dans le chapitre 2 nous avons modélisé analytiquement une MSAP à l'état sain et en presence de defauts ( état défaillant) sous Matlab/Simulink, ce qui nous a permis de modéliser les défauts de court circuit entres spires du stator pouvant survenir dans la machine d'une part et de mettre en évidence l'effet de ces défauts sur le fonctionnement de la machine, les signatures associées à chaque défaut et de suivre les éventuelles évolutions qui peuvent être générées suite à ces anomalies.

D'après les résultats de simulation obtenus pour les deux modèles étudiés (sain et défaillant) on a constaté que les courts-circuits au bobinage statorique provoquent un déséquilibre des courants des phases statoriques et une augmentation dans les amplitudes notamment la phase défectueuse ainsi que le courant de défaut dont l'amplitude augmente en fonction de de la gravité de défaut. Par la suite, dans le chapitre 3, différentes techniques de diagnostic basées sur le traitement du signal ont été étudiées et pour certaines testées (analyse spectrale par FFT). Ceci a permis de définir les domaines d'utilisation et de voir les limites rencontrées pour chaque méthode. Cette analyse a permis de connaître le comportement du moteur à l'état sain et lors d'une anomalie de court-circuit entres spires d'une phase statorique (apparition des raies de frequences specifiques :surtout 150Hz et 250 Hz dans le spectre du courant de phase et 100Hz et 200Hz dans le spectre du couple et de vitesse) ces fréquences peuvent être sans doute des signatures pertinentes de défaut en question. Les résultats de simulation montrent alors qu'un défaut de court-circuit entre spires produit des ondulations de fréquence double dans le couple et la vitesse.

En fin on peut conclure que les résultats obtenus par le modèle mathématique ainsi développé sont en bonne corrélation. Par conséquent, le modèle peut trouver son application dans les algorithmes de détection et de diagnostic des défauts statoriques afin de détecter les défauts qui peuvent survenir et de contribuer au diagnostic précoce et à la maintenance prédictive des machines synchrones à aimants permanents.

# *Bibliographique*

## **Références Bibliographiques**

**[AMO12]**: AMOR khlaief «*Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)* » Thèse de doctorat école Centrale Marseille 2012.

**[And 08]**: R. N. Andriamalala, H.Razik, L. Baghli, and F-M. Sargos ,“*Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects*”; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, Dec. 2008.

**[AND12]**: ANDRIAN Ceban «*Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Electriques*», Thèse De L’université Lille De Nord De France 2012.

**[AUB14]**: AUBERT Brice «*Détection Des Courts-Circuits Inter-Spires Dans Les Générateurs Synchrones A Aimants Permanents - Méthodes Basées Modèles Et Filtre De Kalman Etendu*» Thèse Doctorat De L’université De Toulouse 2014.

**[BAB09]**: BABAK Vaseghi «*Contribution A L’étude Des Machines Electriques En Présence De Défaut Entre-Spires Modélisation – Réduction Du Courant De Défaut* », Thèse Doctorat, Université Nancy 2009.

**[BAM16]**: BECHKAOUI AMAR «*Diagnostic des défaut dans les machines synchrones à vitesse variable* »Doctorat, Université Badji Mokhtar –Annaba, 14 juin 2016.

**[BAU14]**: M. BRICE AUBERT, «*détection des courts-circuits inter-spires dans les generateurs synchrones a aimants permanents: methodes basees modeles et filtre de kalman étendu,* » doctorat de l’université de toulouse 31mars 2014.

**[BEL13]**: BELBECHE Adel «*Modélisation, Diagnostic et Commande d’une Machine Asynchrone avec Rupture d’une Phase* », PFE d’Ingénieur d’Etat en Electrotechnique, Université de Batna 2013.

**[BEN09]**: BENBRAHIM Amel «*Commande Prédicative Généralisée d’une Machine Synchrone à Aimants Permanents* »Mémoire de Magister Université de BATNA 2009.

**[BOI09]**: BOUCHARREB Ilhem, «*Modélisation & Simulation de Défauts D’une Machine Synchrone à Réductance Variable*», Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.

**[Bon 92]**: A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.28 no.4, pp. 921-937, Aug 1992.

**[Bonnett 00]**: A. H. Bonnett. Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 5, pages 1435–1448, 2000.

**[CHE 05]**: CHEMMOURI Boudjemaa «*Commande Non-Linéaire D’une Machine Synchrone A Aimants Permanents*», PFE d’ingénieur d’état en Génie Electrotechnique Université Mohamed Boudiaf de M’sila 2005.

**[Dev 01]:** V. Devanneaux, H. Kabbaj, B. Dagues et J. Faucher, "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity" *Proc. IEEE SDEMPED 2001*, pp.121-126, September 2001.

**[Far 08]:** J. A. Farooq, R. Tsarafidy, D. Abdesslem, A. Miraoui, "Modelling and simulation of Stator winding inter-turn faults in permanent magnet synchronous motors", *COMPEL*, Volume: 27, Issue: 4, 2008.

**[Hen03]:** H. Henao, C. Demian, G.A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.39, no.5, pp.1272,1279, Sept.-Oct. 2003.

**[KBR14]:** KAROUI Abdelmounaim, BRAHIMI Ammar, "Détection De Défaut Statorique Par Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents", *MASTER ACADEMIQUE, UKM Ouargla*, 09 juin 2014.

**[KHO09]:** KHOV Makara «Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants Permanents », *Thèse de Doctorat de L'université De Toulouse* 2009.

**[Khu 01]:** A. Khurram, "Position and speed sensor-less control of permanent magnet synchronous motors." *Ph.D. dissertation, Michigan State University, MI*, 2001.

**[Mel03]:** M.G. Melero, M.F. Cabanas, C. Rojas, G.A. Orcajo, J.M. Cano, J. Solares, "Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition", *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2003. *SDEMPED 2003. Fourth IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.52, 57, 24-26 Aug. 2003.

**[Mou 11]:** M. Moumna "Détection et diagnostic des défauts d'une machine synchrone à aimants permanents", *Thèse Magister, Université Mohamed Boudiaf Oran*, 2011.

**[Nan 99]:** S. Nandi, H.A. Toliyat, "Fault diagnosis of electrical machines-a review", *Electric Machines and Drives*, 1999. *International Conference IEMD '99*, vol., no., pp.219, 221, May 1999, DOI:10.1109/IEMDC.1999.769076

**[Odo 85]:** P. O'Donnell, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. IA,21, N° 4, Aug. 1985, pp. 853 – 864.

**[OHA16]:** Najla Haje Obeid, « Contribution à la détection des défauts statoriques des actionneurs à aimants permanents : Application à la détection d'un défaut inter-spires intermittent et au suivi de vieillissement » *Doctorat de l'Université de Lorraine*, 07 Novembre 2016.

**[Rai 00]:** B. Raison, *Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique*, *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble*, 2000.

**[Rajagopalan 06]:** S. Rajagopalan, J. M. Aller, J. A. Restrepo, T. G. Habetler & R. G. Harley. *Detection of rotor faults in brushless DC motors operating under non-stationary*

conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pages 1464–1477, Nov.-Dec. 2006.

**[Sak 12]** : Y. Saker "Commande vectorielle d'une machine asynchrone avec défaut", mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

**[Trajin 09]**: B. Trajin. "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones ». Application à la surveillance des roulements à billes. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2009.

**[Val 92]**: V. Valkenburg, *Basic Electricity*, Nooger & Neville Inc., 1992.

**[Vas 09]** : B. Vaseghi, *Contribution à l'étude des machines en présence de défaut entres pires - Modélisation - Réduction du courant de défaut*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

**[ZSA15]** : ZOUZOU. Sara " Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées " Mémoire de Magister, Université de Biskra 2015.

# *Annexe*

## *Annexe A*

Les paramètres de la machine synchrone à aimant permanent utilisée sont :

<b>Caractéristique</b>	<b>unité</b>	<b>valeur</b>
<b>Tension nominale</b>	V (V)	50
<b>Fréquence d'alimentation</b>	F (Hz)	50
<b>Nombre de pair de pole</b>	p	4
<b>Résistance de statorique</b>	Rs ( $\Omega$ )	0.88
<b>Inductance statorique</b>	Ls (mH)	2.82
<b>Flux d'aimant</b>	Phm (Wb)	0.108
<b>Coefficient de frottement</b>	f(N.ms)	0.007
<b>Inertie</b>	J(Kg.m <sup>2</sup> )	0.0006
<b>Courant de phase</b>	I(A)	19



## THEME

### DETECTION DE DEFAUTS DE COURT-CIRCUIT ENTRE SPIRES STATORIQUES D'UNE MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS (MSAP).

**Proposé et dirigé par :**

**Dr. Y.LAAMARI**

**Réalisé par :**

**- BOUSSAG ESSADIQ**

**- BOUAZIZ SAID**

### **Résumé**

L'objectif du présent mémoire est l'établissement de modèles suffisamment précis permettant de déterminer rapidement le comportement des différentes variables d'une machine synchrone en présence d'un défaut électrique au niveau du stator dû à un court-circuit entre spires. Sachant que l'apparition d'un défaut électrique au stator modifie la répartition du courant dans les encoches du stator ; notre étude sera consacré à la modélisation de la MSAP en régime sain et en présence de défauts statoriques (défaut de court-circuit entre les spires). Une transformation mathématique (transformation de Concordia) est proposée et appliquée sur les équations du modèle triphasé équivalent de la machine. Cette modélisation sera détaillée depuis les équations du modèle triphasé jusqu'à l'obtention des équations finales.

Par la suite, les résultats issus du modèle mathématique développé de la MSAP à l'état sain et en présence de défaut de court-circuit entre spires ont été exploités grâce à la technique d'analyse dans le domaine fréquentiel des signaux par FFT. Cela nous a permis d'extraire des signatures (composantes fréquentielles) relatives à la présence de ce type de défaut.

**Mots clés : Diagnostic, Modélisation, Machine Synchrone à Aimants Permanents, FFT, défauts statoriques, analyse spectrale.**