

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

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Électrique

Mémoire de Master

Spécialité : Electromécanique et système de commande

Thème

**Modélisation de la machine asynchrone double
étoile en vue du diagnostic du défaut de court-
circuit entre spires statoriques**

Proposé par

N.YASSA

Réalisé par

HADJOUTI Yassine

HAMBLI Ali

Promotion 2017

Remerciements

En préambule à ce mémoire

**Nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage
durant ces longues années d'étude.**

**Ce présent mémoire, n'aurait pu voir le jour sans la contribution de
nombreuses personnes dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un
devoir de les remercier, et de leur témoigner notre profonde gratitude.**

**Nous remercions notre promotrice Dr N.YASSA pour l'intérêt
qu'elle a apporté à ce travail, qu'elle nous est accordée tout au long de
Ce travail. A tous les enseignants de la FACULTE GENIE ELECTRIQUE
qui n'ont pas cessé de nous porter aide et assistance.**

**Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien moral et matériel.
Qu'il soit de même pour tous nos amis dont le soutien indéfectible et
leur fidélité en amitié. Merci.**

**Nous présentons également nos remerciements aux membres de
jury qui daigneront, évaluer et juger notre travail.**

**Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé,
de près ou de loin durant notre formation.**

Sommaire

Remerciement

Liste des figures

Liste des symboles

Résumé

Introduction générale

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les défaillances dans les machines asynchrones

I.1. Introduction	3
I.2. Caractéristiques des machines multi-phasées	3
I.2.1. Machines multi-phasées de type 1	3
I.2.2. Machines multi-phasées de type 2	4
I.3. Constitution de la MASDE	5
I.3.1. Stator	6
I.3.2. Rotor	7
I.4. Principe de fonctionnement	8
I.5. Application de la machine asynchrone double étoile	8
I.5.1. Avantages de la MASDE	8
I.5.1.1. Segmentation de la puissance	9
I.5.1.2. Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotorique.....	9
I.5.1.3. Elimination d'harmonique d'espace.....	9
I.5.2. Inconvénients de la MASDE	9
I.6. Défauts des machines électriques tournantes	9

Sommaire

I.6.1. Causes des défauts statorique.....	12
I.6.1.1. Défaut d'isolant	12
I.6.1.2. Court-circuit entre phases	13
I.6.1.3. Court-circuit entre spires.....	13
I.6.1.4. Défaillance des flasques	14
I.6.2. Défauts rotoriques	14
I.6.2.1. Défauts de roulements	14
I.6.2.2. Défaut de rupture des barres et des anneaux de court-circuit.....	15
I.6.2.3. Excentricité	16
I.7. Techniques d'analyses et méthodes de diagnostic	17
I.7.1. Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées.....	18
I.7.1.1. Méthodes de diagnostic des défauts basés sur l'analyse spectrale des signaux.....	18
I.7.1.1.1. Analyse fréquentielle du courant statorique	19
I.7.1.1.2 Analyse fréquentielle de la puissance instantanée.....	20
I.7.1.1.3. Analyse fréquentielle de la tension du neutre	20
I.7.1.1.4. Analyse des flux	20
I.7.1.1.5. Analyse du couple électromagnétique	21
I.7.1.1.6. Analyses vibratoires de la machine	21
I.7.2. diagnostic de défaut par estimation paramétrique	22
I.8. Conclusion.....	22

Chapitre 2 : Modélisation de la MASDE en régime sain

II.1. Introduction.....	23
II.2. Différentes méthodes de modélisation des machines électriques.....	24
II.2.1 La méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC)	24
II.2.2 La méthode des éléments finis (MEF).....	24
II.2.3 La méthode des réseaux de réluctances (MRR).....	24
II.3. Description de la machine asynchrone double étoiles (MASDE)	25
II.4. Hypothèses simplificatrices	25
II.5. Modèle de la MASDE dans le repère naturel	26
II.5.1. Equations électriques.....	26
II.5.2. Equation mécanique	28
II.5.3. Expression du couple électromagnétique	29
II.5.4. Equation d'état	29
II.6. Simulation et interprétation les résultats	30
II.6.1. Résultat simulation	30
II.6.1.1 Fonctionnement à vide	30
II.6.1.2 Fonctionnement en charge	32
II.6.2. Interprétation des résultats de la simulation	34
II.7. Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de la MASDE en présence défaut de court-circuit entre spires statorique

III.1. Introduction.....	35
III.2. Influence d'un court-circuit sur les courant des ligne	35
III.3. Modèle de la MASDE à rotor bobiné avec défaut de court- circuit	36
III.4. Modèle de la MASDE avec un court-circuit dans la 1 ^{ère} étoile	37

Sommaire

III.4.1. Equation électrique.....	37
III.4.2. Matrices des inductances mutuelles entre la phase en court-circuit et les phases Statoriques et rotoriques	38
III.5. Equation d'état.....	39
III.6. Résultats de simulation	40
III.6.1. Court-circuit dans la deuxième étoile du stator.....	46
III.6.2. Résultats du simulation	46
III.6.3. Interprétation des résultat	51
III.7. Conclusion	52
Bibliographié	
Annexe	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les défaillances dans la machine asynchrone double étoile

Figures	Noms	Pages
Figure I.1	vue éclaté d'une machine asynchrone double étoile	6
Figure I.2	Stator d'une machine asynchrone	6
Figure I.3	Vue du rotor à cage d'écureuil	7
Figure I.4	Exemple d'application d'une machine asynchrone double étoile	8
Figure I.5	Evolution du pourcentage des défauts pendant une décennie	11
Figure I.6	(a) et (b) court-circuit entre phases	13
Figure I.7	Court-circuit entre spire de la même phase	13
Figure I.8	Vue éclaté d'un roulement à billes	15
Figure I.9	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil, (a) rupture d'anneau, (b) rupture des barres	16
Figure I.10	Excentricité statique	16
Figure I.11	Excentricité dynamique	17
Figure I.12	Excentricité mixte	17
Figure I.13	Mesures vibratoires sur la machine asynchrone	22

Chapitre II : modélisation de la MASDE en régime sain

Figures	Noms	Pages
Figure II.1	Représentation de la MASDE	21
Figure II.2	Vitesse de rotation	26
Figure II.3	Couple électromagnétique	26
Figure II.4	Courants statorique 1 ^{er} étoile	27
Figure II.5	Courant statorique 2 ^{em} étoile	27
Figure II.6	Courant rotoriques	27
Figure II.7	Vitesse de rotation en charge	28
Figure II.8	Couple électromagnétique en charge	28
Figure II.9	Courants statorique (1 ^{er} étoile)	28

Liste des figures

Figure II.10	Courants statorique (2em étoile)	29
Figure II.11	Courants rotoriques en charge	29

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MASDE avec défaut de court-circuit entre spires statorique

Figures	Noms	Pages
Figure III.1	la MASDE en présence du défaut de court-circuit entre spires à la 1ère étoile	32
Figure III.2	Vitesse de rotation	36
Figure III.3	Couple électromagnétique	36
Figure III.4	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	36
Figure III.5	Courants statoriques (2em étoile)	37
Figure III.6	Courants rotoriques	37
Figure III.7	Vitesse de rotation	37
Figure III.8	Couple électromagnétique	38
Figure III.9	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	38
Figure III.10	Courants statoriques (2em étoile)	38
Figure III.11	Courants rotoriques	39
Figure III.12	Vitesse de rotation	39
Figure III.13	Couple électromagnétique	39
Figure III.14	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	40
Figure III.15	Courants statoriques (2 ^{em} étoile)	40
Figure III.16	Courants rotoriques	40
Figure III.17	Vitesse de rotation	41
Figure III.18	Couple électromagnétique	41
Figure III.19	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	41
Figure III.20	Courants statoriques (2 ^{em} étoile)	42
Figure III.21	Courants rotoriques	42
Figure III.22	Vitesse de rotation	42

Liste des figures

Figure III.23	Couple électromagnétique	43
Figure III.24	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	43
Figure III.25	Courants statoriques (2 ^{em} étoile)	43
Figure III.26	Courants rotoriques	44
Figure III.27	Vitesse de rotation	44
Figure III.28	Couple électromagnétique	44
Figure III.29	Courants statoriques (1 ^{er} étoile)	45
Figure III.30	Courants statoriques (2 ^{em} étoile)	45
Figure III.31	Courants rotoriques	45

Liste des symboles

Liste des symboles

CEMC	Circuits Electriques Magnétiquement Couplés
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
C_r	Couple résistant [N.m]
$[C_r]$	Vecteur des éléments rotoriques du couple résistant [N.m]
$[C_s]$	Vecteur des éléments statoriques du couple résistant [N.m]
F_r	Coefficient de frottement visqueux [Hz]
F_s	Fréquence de l'alimentation de réseaux [Hz]
J	Moment d'inertie [$K_g m^2$]
$[I_{s1}]$	intensités du courant de l'étoile 1 suivants les axes a, b, c [A]
$[I_{s2}]$	intensités du courant de l'étoile 2 suivants les axes a, b, c [A]
$[I_r]$	intensités du courant rotorique [A]
g	Glissement
L_{cc}	Inductance mutuelle propre de court-circuit [H]
L_{r1}	Inductance de fuite au rotor [H]
L_{rr}	Inductance propre rotor [H]
$[L_{rr}]$	Matrice inductances propres et mutuelles rotoriques [H]
L_{s1}	Inductance de fuite au stator [H]
L_{ss}	Inductance propre rotor [H]
$[L_{ss}]$	Matrice inductances propres et mutuelles entre statoriques [H]

Liste des symboles

$[Mb_{sr}]$	Matrices des dérivés des inductances mutuelles stator-rotor [H]
MEF	Méthode numérique par les éléments finis [H]
M_{ccr}	Inductance mutuelle de court-circuit stator-rotor [H]
M_{ccs}	Inductance mutuelle de la phase en court-circuit et la phase statorique [H]
$[MM_{cr1}]$	Matrice des mutuelles entre rotor et bobine de court-circuit au stator [H]
$[MM_{rs}(\theta)]$	Matrice des inductances mutuelles stator-rotor [H]
$[M_{scc1}]$	Matrice des mutuelles de court-circuit statorique par rapport à stator [H]
$[M_{rcc1}]$	Matrice des mutuelles de court-circuit entre la phase an cc et les phases statoriques [H]
MRR	Méthode par les réseaux de réluctances [H]
M_{sr}	Valeur maximale d'inductance mutuelle stator-rotor [H]
N_{cc}	Le nombre de spire en court-circuit
N_s	Nombre de spire totale
p	Nombre de paires de pole
$[R_s]$	Résistance d'un axe statorique[Ω]
$[R_r]$	Résistance d'un axe rotorique[Ω]
$[R_{ss}]$	Matrice des résistances statoriques[Ω]
$[R_{rr}]$	Matrice des résistances rotoriques[Ω]
R_{cc}	Résistance de court-circuit[Ω]
$[V_{s1}]$	Tensions statoriques de l'étoile 1 suivants les axes a,b,c [V]
$[V_{s2}]$	Tensions statoriques de l'étoile 2 suivants les axes a,b,c [V]
$[V_r]$	tensions rotoriques suivants les axes a, b, c [V]

Liste des symboles

W_{co}	Co-énergie magnétique
m_{sr}	Inductance mutuelle entre stator-rotor [H]
n_{cc}	Le coefficient de spires au court-circuit
α	Angle électrique [rad]
θ	Angle entre rotor et stator [rad]
θ_{cc}	Angle de court-circuit [rad]
$[\phi_{s1}]$	Flux statorique de l'étoile 1 suivants les axes a, b, c [Wb]
$[\phi_{s2}]$	Flux statorique de l'étoile 2 suivants les axes a, b, c [Wb]
$[\phi_r]$	Flux rotorique [Wb]
ω_{gl}	Vitesse de glissement [rad/s]
ω_r	Vitesse de rotation angulaire [rad/s]
ω_r	Vitesse de rotation [tr/min]
ω_s	Vitesse se synchronisme [rad/s]

Résumé

L'objectif de ce travail est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone double étoile qui met en évidence l'influence des défauts sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants afin d'étudier les phénomènes mis en jeu, approche dite méthode des Circuits Electriques Magnétiquement couplés (*CEMC*) qu'on a utilisé ne nécessite pas d'outils de calcul complexes. Les défauts étudiés sont le court-circuit entre spires dans les phases statoriques.

Pour aborder cette étude, nous avons établi un état de l'art sur la constitution de la machine asynchrone double étoile en mettant l'accent sur les possibilités d'apparition des défauts tant au stator qu'au rotor, et les divers outils utilisés pour la détection et le diagnostic. Ensuite, nous avons un modèle réel de la machine asynchrone double étoile, basé sur une représentation d'état est obtenue dont la résolution permet de retrouver l'évolution de toutes les grandeurs de la machine, en fin, Un programme écrit sous *MATLAB* nous a permis de valider ce modèle.

Introduction générale

Pour des applications de forte puissance, telle que la traction ferroviaire, la propulsion navale, l'automobile, l'aérospatiale, l'industrie pétrochimique, etc... les machines polyphasées procurent beaucoup d'avantages par rapport à la machine triphasée. Le nombre élevé de phase mène à une réduction des ondulations du couple électromagnétique. La machine polyphasée constitue donc un choix intéressant pour la modération des vibrations et la discrétion des bruits. L'augmentation du nombre de phases permet d'accroître la possibilité de fonctionner en mode dégradé en gardant une qualité convenable du couple. Cette particularité est intéressante du fait que la majorité des applications doivent assurer une continuité de service. Dans un autre contexte, aller vers un nombre de phases supérieur à trois, engendre un fractionnement de la puissance, diminuant ainsi les contraintes de dimensionnement des composants de l'électronique de puissance. [30].

Le diagnostic des machines électrique est largement développé dans le monde industriel, car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre, devient, pour certaine application indispensable, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable, c'est pour éviter ces problèmes que la recherche s'emploie sur des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour objectif principal de prévenir les utilisateurs d'un risque possible peut apparaître en un point particulier de système

Ce travail est porté sur l'étude d'une machine à rotor bobiné relativement simple, et un stator à deux étoiles, nous allons nous intéresser uniquement au défaut de court-circuit statorique [1].

Dans le premier chapitre, nous présenterons une description de la machine asynchrone double étoile, le principe de fonctionnement, ces avantages et ces inconvénients, ensuite, les type de défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone, et puis, les méthodes de diagnostic utilisés pour analyser ces défaillances.

Dans le deuxième chapitre, nous avons élaboré un modèle mathématique d'une machine asynchrone double étoile en régime sain, en utilisant la méthode de circuit électrique magnétiquement couplés *CEMC*.

Le troisième chapitre traitera un modèle de la machine asynchrone double étoile avec un défaut statorique qu'il s'agit d'un court-circuit entre spires, ce modèle sera mis en évidence sous l'environnement Matlab afin d'analyser les grandeurs temporelle tel que les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

Introduction générale

En fin, on a conclu que les résultats qu'on a obtenu pouvant être utilisé comme une base de données pour compléter un processus de diagnostic.

Chapitre I

Généralité sur les défaillances dans la machine asynchrone double étoile

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons, d'une part, la constitution et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile (MASDE), ses applications, ses avantages et ses inconvénients, et d'autre part, les types des défauts qui peuvent apparaître dans cette machine, enfin nous rappelons brièvement les techniques de base couramment utilisées pour la détection des défauts.

I.2. Caractéristiques des machines multiphasées

On distingue habituellement deux types de machines multiphasées, suivant le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois. On peut ainsi les classer en deux groupes que l'on nommera « machine multiphasée de type 1 » et « machine multiphasée de type 2 ».

I.2.1. Machines multiphasées de type 1 [22]

Dans ce type de machines qui sont appelées aussi machines multi-étoile, le nombre de phases statoriques q est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en n étoiles triphasées

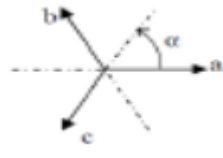
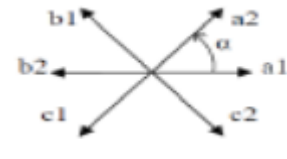
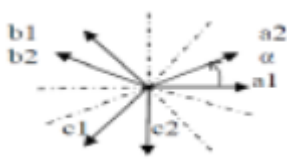
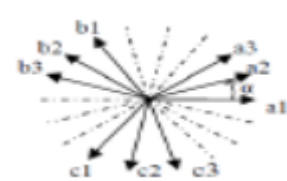
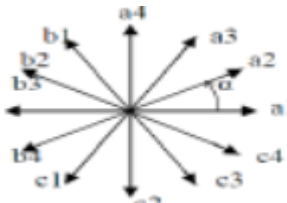
$$q = 3n \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots) \quad (I.1)$$

Pour un nombre donné de phases, il est possible d'avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

En effet, une machine double étoile dont le nombre de phases statoriques $q=6$ et les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{6}$ a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{3}$.

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté q_α , dont la définition est comme suit : $q_\alpha = \frac{q}{3}$ [1].

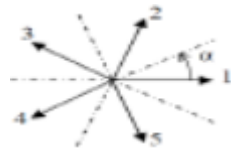
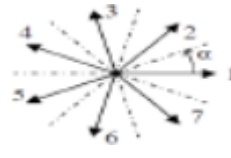

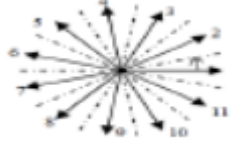
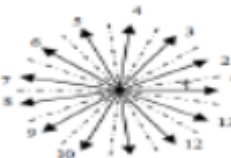
Tableau I.1 : Machines multiphasées de Type 1 [1,22] .

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α) degré	Représentation des axes des bobines
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	

I.2.2. Machines multiphasées de type 2 [22]

Dans ce type de machines, le nombre de phases statoriques est un nombre impair. Si α représente le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les phases sont alors régulièrement décalées de $\frac{2\pi}{q} = 2\alpha$, On a donc toujours $q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$

Tableau(I.2) : Machines multiphasées de type 2 [1,22] .

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α) degré	Représentation des axes des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	 A diagram showing five axes labeled 1 through 5, spaced at an angle of $\frac{\pi}{5}$ from each other. The first axis is labeled '1' and the angle between the first and second axis is labeled ' α '.
7	7	$\frac{\pi}{7}$	 A diagram showing seven axes labeled 1 through 7, spaced at an angle of $\frac{\pi}{7}$ from each other. The first axis is labeled '1' and the angle between the first and second axis is labeled ' α '.
9	9	$\frac{\pi}{9}$	 A diagram showing nine axes labeled 1 through 9, spaced at an angle of $\frac{\pi}{9}$ from each other. The first axis is labeled '1' and the angle between the first and second axis is labeled ' α '.
11	11	$\frac{\pi}{11}$	 A diagram showing eleven axes labeled 1 through 11, spaced at an angle of $\frac{\pi}{11}$ from each other. The first axis is labeled '1' and the angle between the first and second axis is labeled ' α '.
13	13	$\frac{\pi}{13}$	 A diagram showing thirteen axes labeled 1 through 13, spaced at an angle of $\frac{\pi}{13}$ from each other. The first axis is labeled '1' and the angle between the first and second axis is labeled ' α '.

I.3. Constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)

La machine asynchrone double étoile est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor, contrairement aux machines asynchrones triphasés elle possède plus de 3 phases au stator (2x3 phases), et contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation, les enroulements rotoriques sont raccordés sur eux-mêmes.

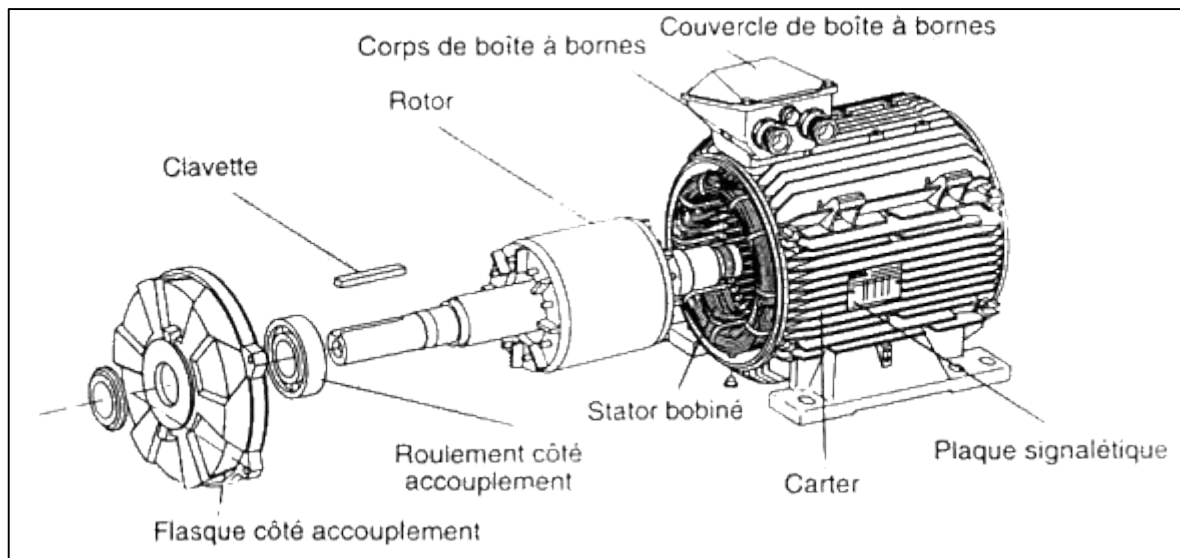


Figure I.1 : vue éclaté d'une machine asynchrone double étoile

I.3.1. Stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent 6 bobinages indépendants, composent deux groupes de trois phases qu'on appelle les étoiles, chaque étoile est décalée par rapport à l'autre par un angle électrique (α) et alimentée par un réseau triphasé équilibré, elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par des systèmes de tensions ou de courants triphasés [1].



Figure I.2: stator d'une machine asynchrone

I.3.2. Rotor

Le rotor présente deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation de la machine, nous distinguons le rotor bobiné qui supporte trois bobinages similaire à celui du stator, où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même, La deuxième configuration qui est la plus usitée dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil [1].

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un Conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure 1.1), Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné [1].

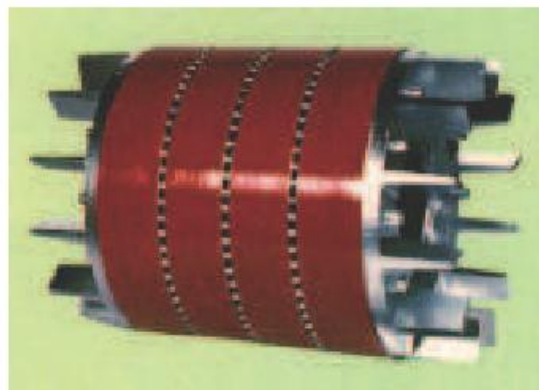


Figure I.3 : Vue du rotor à cage d'écureuil.

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor, Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur, de plus, il dispose d'une plus grande robustesse [1].

Son inconvénient majeur est qu'il a au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développées deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

I.4. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur l'application des principes I, II et III de l'électromagnétisme (loi d'Ampère, loi de La Place et la loi de Faraday).

Grace à l'interaction électromagnétisme des champs tournants créés par le système de tension fournie au stator et par les courants induits dans le rotor, ce dernier tourne dans le même sens que le champ tournant, mais à vitesse inférieure de celle de synchronisme, car, dans le cas contraire, le champ serait immobile par rapport au rotor, et aucun courant ne serait inuit.

I.5. Application de la machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile (MASDE) est beaucoup plus utilisée dans les applications de puissances élevées, Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs et les moulins du ciment, une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne, (voir la figure I.4) [2,22].

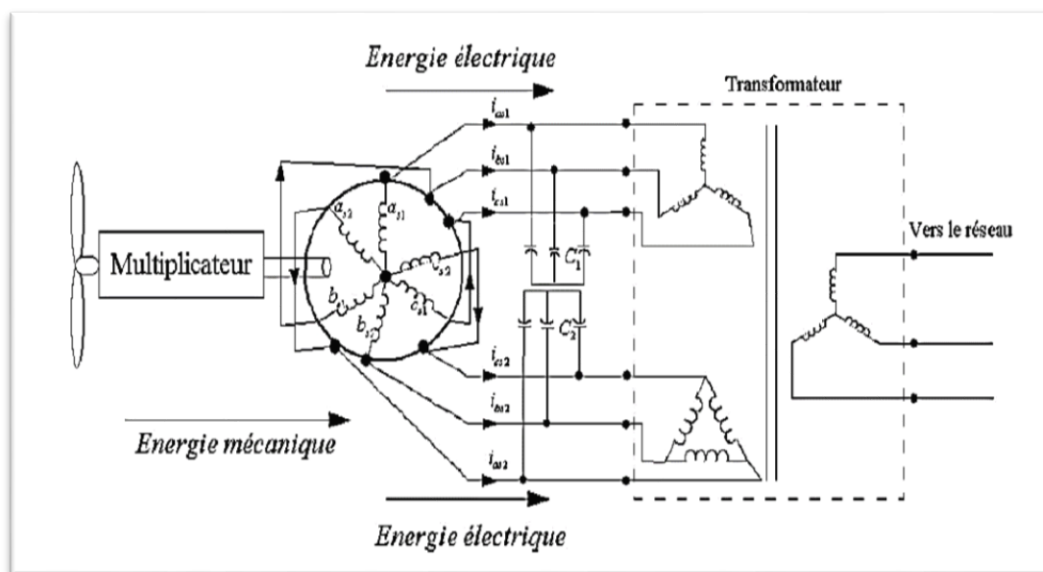


Figure I.4 : Exemple d'application d'une machine asynchrone double étoile [2,22] .

I.5.1. Avantages de la MASDE

La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées nous pouvons citer [2] :

I.5.1.1.Segmentation de la puissance

A puissance donnée, lorsque l'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase (ou l'inverse). La puissance totale est donc répartie sur un nombre important de phases, la puissance demandée par chacune d'elles est alors réduite. La segmentation de la puissance est l'avantage des machines multiphasées que l'on met le plus en avant de nos jours, surtout pour les applications de forte puissance [22].

I.5.1.2.Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Dans les machines triphasées, l'ondulation du couple électromagnétique dont la fréquence est six fois celle du fondamental, est principalement créée par les harmoniques cinq et sept de temps. Dans une machine double étoile, par exemple, ces harmoniques ne créent pas de f.m.m, l'harmonique du couple de rang six est donc naturellement éliminé. De plus puisque certains harmoniques de courants statoriques ne créent de f.m.m ; les courants pouvant être induits au rotor n'existent pas pour ces harmoniques, par conséquent, une machine multiphasée aura pratiquement toujours moins de pertes rotoriques qu'une machine [22].

I.5.1.3.Elimination d'harmonique d'espace

La possibilité d'éliminer des harmoniques d'espace est un réel avantage des machines multiphasées. Ainsi, à un nombre d'encoches donné, plus le de phase augmente, plus le nombre d'encoche par pôle et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental.

I.5.2. Inconvénients de la MASDE

La MASDE présente des inconvénients tels que [2] :

- Le nombre de semi-conducteur augmente avec le nombre de phase, ce qui peut éventuellement augmenter le cout de l'ensemble convertisseur-machine.
- L'inconvénient majeur des machines double étoile est l'apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

I.6. Défaits des machines électriques tournantes

Dans ce paragraphe, des différents défauts des machines électrique sont présentés, leurs origines et leur classification.

Une défaillance d'une machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son

endommagement, les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance [5].

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories, interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer) [5].

Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [5].

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau(I.3) :

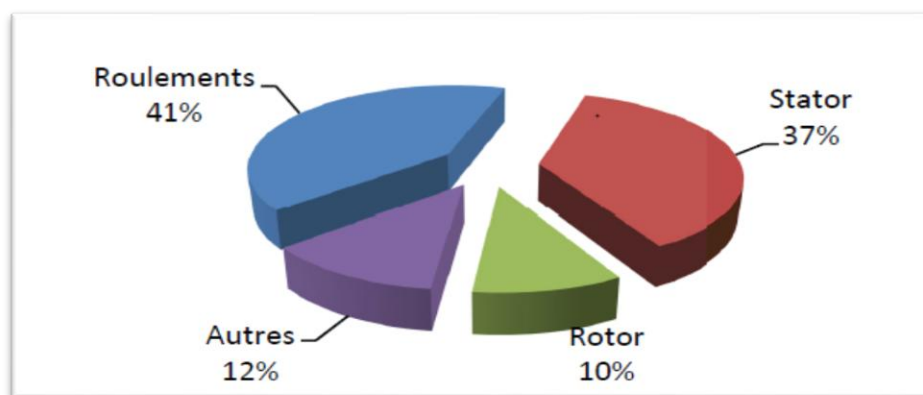
Tableau I.3 : Les défauts des machines électriques selon leurs origines [5].

Défaillance des machines électriques	Interne	Mécanique	Contacte entre stator-rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Electrique	Mouvement des enroulements et des tôles
			Défaillance au niveau l'isolation
			Rupture des barres
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Electrique	Défaut de montage
			Fluctuation de la tension
			Source de tension déséquilibrée
		Environnementale	Réseau bruité
			Humidité
			Température
		Propreté	

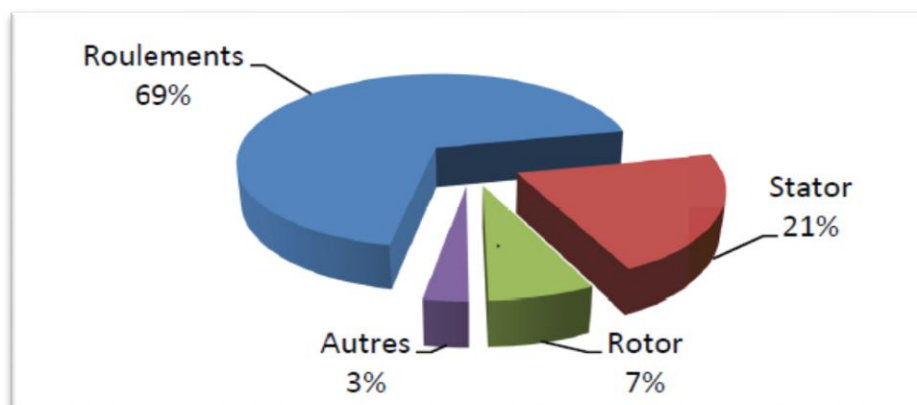
Des multiples études statistiques sur des machines électriques ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent, toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie [5].

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (100 KW à 1MW) dans les années 90 par Thorsen mentionnées après par Thomson ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes les plus fréquentes sont de type mécanique la majorité d'entre elles se situent dans les roulements (41%) et le stator (37%) les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10%) et les autres types constituant (12%) [5].

Une étude statistique faite par Bonnett [7] sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que (69%) des pannes se situent sur les roulements, (21%) au stator, (7%) au rotor et (3%) dans les autres régions de la machine [5].



Thomson 1999 [6].



(b) Bonnett 2008 [7].

Figure I.5 : Evolution du pourcentage des défauts pendant une décennie

La répartition présentée confirme que les défauts dans les machines de grande puissance proviennent principalement de roulement et de bobinage statorique.

d'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulement sont passés de 41% à 69%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21% et celle de rotor de 10% à 7%. On constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents cela est dû à l'amélioration des techniques de fabrication des machines électriques, la principale source de défaillance reste les roulements [5].

Il est à noter que les techniques d'alimentations des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique [5].

I.6.1. Causes des défauts statoriques

La majeure partie des défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse. Les causes des défauts dans le stator sont multiples, et les plus fréquents sont [5] :

- Court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration et humidité.
- Court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut, d'installation.
- Défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition température et
- Défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- Déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines.
- Défaillance des connecteurs : vibration excessive.
- Vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

I.6.1.1. Défaut d'isolant

La dégradation des isolants dans les enroulements est à l'origine des courts circuits. En effet, les différentes pertes (joule, fer, mécanique) engendrent des phénomènes thermiques qui se traduisent par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température et de tension, de ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ses limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes de ce type de défaut sont : une tension de l'enroulement supérieur à la limite du matériau

d'isolation, un courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, une surchauffe qui entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation [5]

I.6.1.2. Court-circuit entre phases

L'apparition d'un court-circuit entre phases induirait des courants très élevés conduisant la fusion des conducteurs, cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas un effet radical, il conduit un déséquilibre de phase. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont amplifiés lors de l'apparition de ce défaut [5].



(a) Court-circuit due à un rotor bloqué

(b) Court-circuit due à une surcharge

Figure I.6 : Court-circuit entre phases

I.6.1.3. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent, cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné, dans ce cas la machine peut continuer à fonctionner, mais si le courant du court-circuit est important entraîne une légère variation d'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage, et de ce fait, une dégradation accéléré des isolants, pouvant provoquer ainsi un défaut en chaîne (apparition d'un deuxième court-circuit), il est donc important de détecter un tel défaut très rapidement avant la destruction complète de la machine [5], voir la figure (I.7)

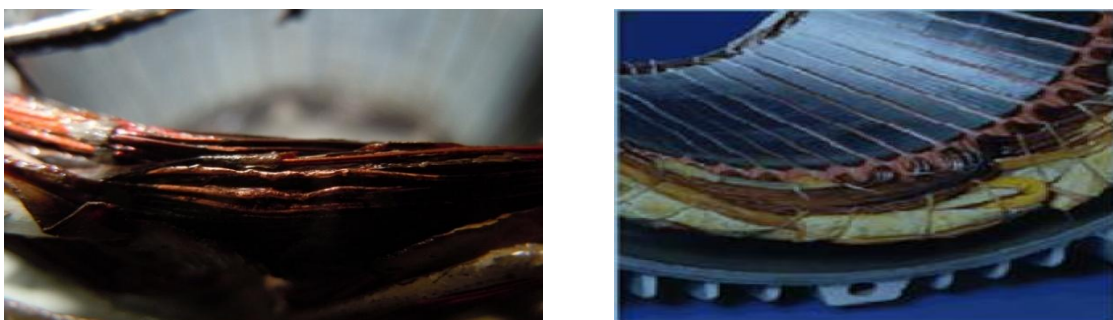


Figure I.7 : Court-circuit entre spire de la même phase

I.6.1.4. Défaillance des flasques

Ces défaillances sont généralement initiées à l'étape de fabrication, en effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes induisant une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillances par une analyse vibratoire où analyse harmonique des courants absorbés par la machine [3].

I.6.2. Causes des défauts rotoriques

Les causes de défauts au rotor sont multiple, les plus fréquents sont énumérées ci-dessous [5] :

- Défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion.
- Rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre Magnétique.
- Rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique.
- Excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
- Désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge.
- Défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique.
- Déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

I.6.2.1. Défauts de roulements

Comme il est indiqué sur la Figure (I.3), la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [5].

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine . Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [5].

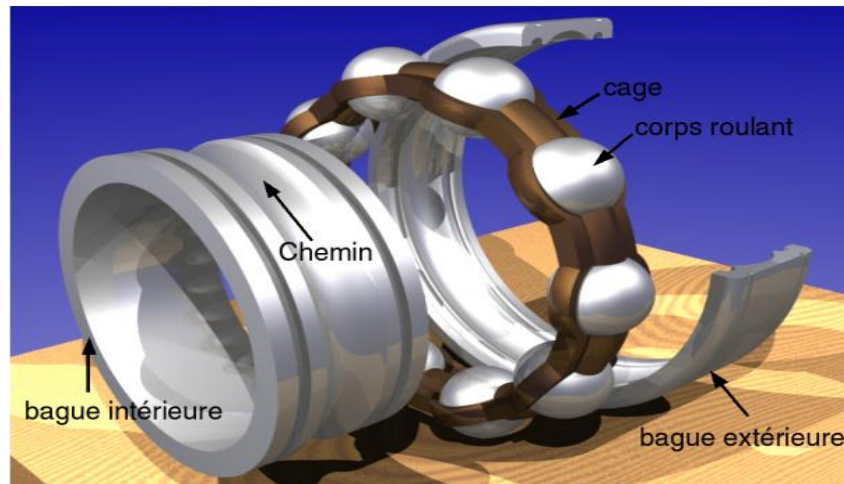


Figure 1.8 : Vue éclatée d'un roulement à bille.

I.5.2.2. Défaut de rupture des barres et des anneaux de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit.

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures), cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques[5].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes, ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine [5].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure des barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques, il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux,

conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [1,5].



Figure I.9 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil, (a) rupture des barres, (b) rupture d'anneau

I.5.2.3. Excentricité

Les excentricités peuvent être statiques, dynamique ou mixte, il s'agit d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator qui peut avoir pour origine un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, un défaut de roulement (usure), un défaut de charge, ou un défaut de fabrication, Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication, le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [5].

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [5]:

- L'excentricité statique généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, figure I.10. la cause principale c'est un défaut de centrage des flasques

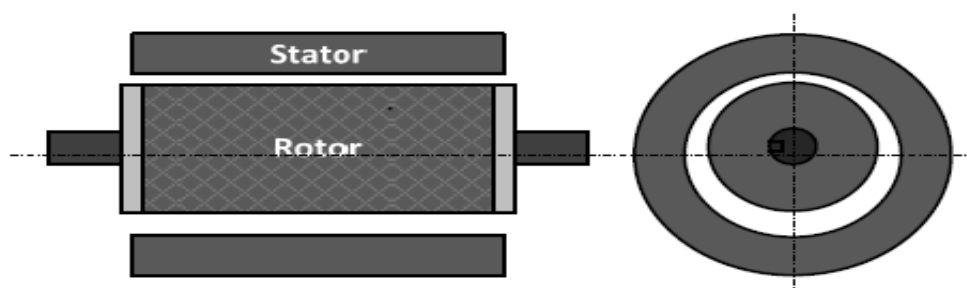


Figure I.10 : Excentricité statique

- L'excentricité dynamique : lorsque le centre de rotation du rotor est différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes figure I.11.

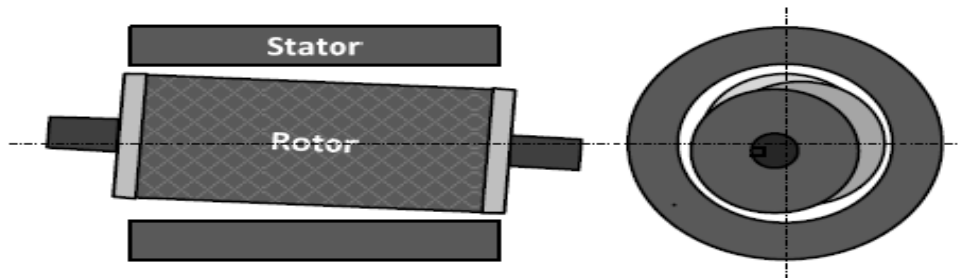


Figure I.11 : Excentricité dynamique

- L'excentricité mixte : dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator. Elle est donc la combinaison des excentricités statique et dynamique.

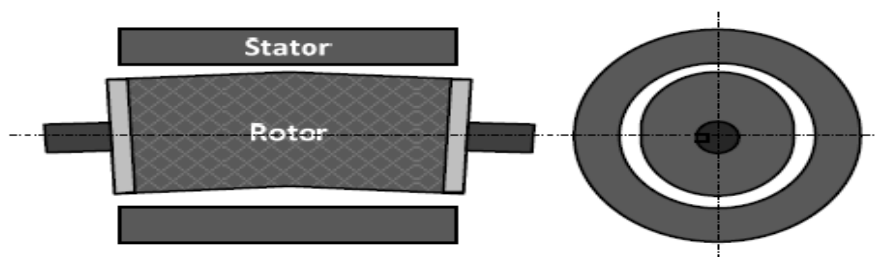


Figure I.12 : Excentricité mixte

I.7. Techniques d'analyses et méthodes de diagnostic

Les techniques de diagnostic et d'analyse de défauts de machines tournantes connaissent un intérêt sans cesse croissant et un essor très important. On peut évoquer deux raisons :

- Les besoins industriels liés au contexte très concurrentiel qui exige une diminution des coûts de fabrication, une disponibilité accrue de l'outil de production, la maîtrise de la qualité de fabrication, le respect des normes.
- Le développement des moyens électroniques, informatiques, qui facilitent l'implantation de méthodes plus complexes mais plus performantes.

Ces besoins ont ainsi générés des études et des recherches dans des domaines technologiques et scientifiques variés mais complémentaires; on peut citer: l'automatique, le traitement du signal, la modélisation des phénomènes physiques, la reconnaissance de formes.

Les machines tournantes figurent en bonne place dans ces préoccupations et touchent tous les secteurs industriels. Elles ont fait l'objet de nombreuses études, applications et développement spécifiques. La surveillance des machines tournantes permet [14]:

- La détection et le diagnostic de défauts en fonctionnement pour éviter les dégradations importantes.
- Le diagnostic des défauts de fabrication lors du contrôle de qualité en production.
- L'analyse fine d'un comportement des machines (vibratoire et acoustique) en vue d'agir sur leur conception (recalage de modèles, réduction du bruit et des vibrations).

Les méthodes d'analyses et de diagnostic utilisent essentiellement l'analyse vibratoire grâce à sa facilité de mise en oeuvre et sa capacité à expliquer les phénomènes dynamiques. Dans le contexte de surveillance, l'analyse de bruit est relativement peu développée dans un contexte industriel. Les raisons sont principalement la plus grande complexité de signaux de bruit (rayonnement, présence d'autres sources...ect). Cependant les techniques utilisant plusieurs capteurs (intensimétrie, acoustique, imagerie, holographie) ont tendance à se développer grâce à l'évolution des systèmes d'acquisition et de traitement. Cette méthodologie est clairement complémentaire de l'analyse vibratoire [20].

I.7.1. Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des défauts.

I.7.1.1. Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine.

A ce jour, c'est l'analyse spectrale des signaux qui est la plus utilisée pour le diagnostic du défaut rotorique. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être [16]:

- Les courants absorbés
- Le flux de dispersion
- La tension d'alimentation
- Le couple électromagnétique
- La vitesse rotorique
- Les vibrations
- La tension de neutre

I.7.1.1.1. Analyse fréquentielle du courant statorique

L'analyse des courants statorique dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électrique et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une MAS.

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence :

$$f_{cs} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$$n=1,2, 3. \quad \text{et} \quad k= 1, 3,5.$$

Cette technique est dénommé dans la littérature « motor current signature analyses »(MCSA). Les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine
- Les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant.

Le technicien de la surveillance doit avoir une bonne connaissance des défauts et leurs signatures à partir du courant statorique [17].

I.7.1.1.2 Analyse fréquentielle de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objectif de nombreux travaux [17]. La puissance instantanée est le produit de la tension d'alimentation et le courant absorbé par le moteur. Donc, la quantité d'informations apportée par cette grandeur, est plus grande que celle apportée par le courant, le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de défaut. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [18].

I.7.1.1.3. Analyse fréquentielle de la tension du neutre

En 1998, Cash a utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone pour détecter des court-circuits entre spires dans le bobinage statorique, dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones. Une analyse similaire a été effectuée par [19][21], dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones. L'information la plus significative pour permettre un diagnostic fiable de la cage rotorique.

$$f_d^{\pm} = [3(1 - g) \pm g]f_s \quad (I.4)$$

I.7.1.1.4. Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer est par la même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques, ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [24].

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor. Le flux axial est le résultat de l'effet des courants sur les extrémités de la machine (têtes de bobines, anneaux de court-circuit) [24].

Les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques, les fréquences caractéristiques sont données par l'expression suivante [21] :

$$kf_s \pm n.f_r \quad (I.5)$$

Ces composantes présentes dans le spectre de flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut.

I.7.1.1.5. Analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmonique dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux ou de trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmonique dans le spectre du couple.

La dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentées dans le spectre du couple estimé [19] :

$$f_{sb} = f_s \left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm 2gf_s \right] \quad (I.6)$$

I.7.1.1.6. Analyses vibratoires de la machine

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations pratiquement sur tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Nous avons remarqué que les composantes fréquentielles, qui permettent d'identifier les défauts cités, dépendent de la fréquence de rotation du rotor. De ce fait, ces signatures ne sont pas assez distinctes les unes par rapport aux autres. Leur utilisation poserait des problèmes de discrimination des types de défauts. Par contre, pour la détection d'un défaut ou d'un déséquilibre au rotor, les vibrations de la machine s'avèrent être des signaux pertinents [16,24].

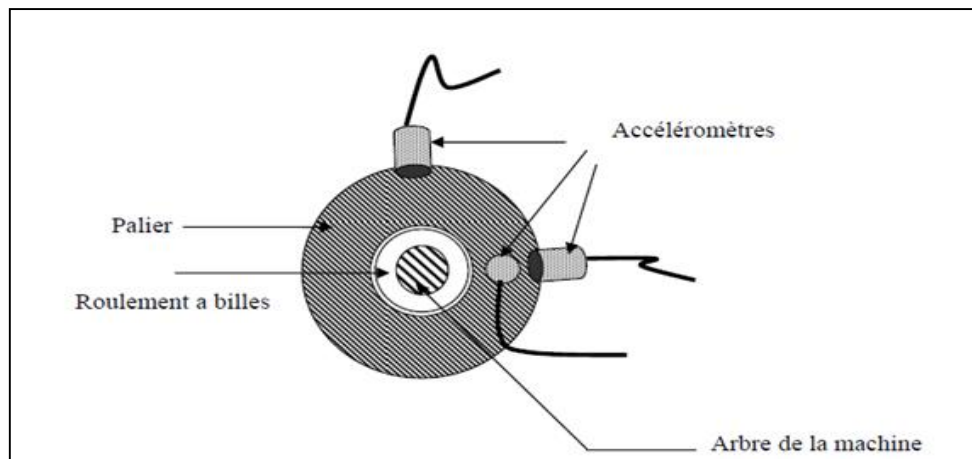


Figure I.13 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

I.6.2 .diagnostic de défaut par l'estimation paramétrique

L'hypothèse fondamentale pour la surveillance d'un système. Par un suivi paramétrique est d'un défaut se traduit par la variation d'un (ou plusieurs) paramètres caractéristiques du système, constituant ainsi les signatures de ce défaut, intuitivement diagnostiquer un défaut revient donc à réaliser un suivi des paramètres d'un modèle de fonctionnement normal (modèle de Park par exemple pour la machine asynchrone) et la simple variation paramétrique est une indication d'un défaut [21].

Le type de défauts que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser [16].

I.7. Conclusion

Ce chapitre, a concerné la représentation des différents défauts pouvant se produire sur la machine asynchrone. Dans un premier temps après avoir rappelé succinctement les éléments de constitution de la machine asynchrone double étoile, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition, ensuite nous avons brièvement rappelé quelques techniques de diagnostic utilisé pour la détection des défauts.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la modélisation de la machine asynchrone double étoile rotor bobinée en absence des défauts.

Chapitre II

Modélisation de la MASDE en régime sain

II.1 Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. Cependant les objectifs d'un modèle de simulation sont différents, ce qui a motivé les chercheurs à mettre au point des modèles basés généralement sur les approches de calculs suivantes :

- Méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC) [3].
- Méthode des réseaux de réluctances (MRR)[11].
- Méthode numérique par les éléments finis (MEF) [10].

Ces méthodes sont largement détaillées dans la littérature scientifique, et présentent des degrés de complexité différents.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone double étoile, la méthode utilisée dans notre étude est la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (*CEMC*). Il s'agit de représenter les bobinages de la machine par des circuits électriques distribués dont les inductances propres et mutuelles sont calculées en utilisant les fonctions de bobinage issues des expressions analytiques du dimensionnement de la machine asynchrone [18]. Ce type de modélisation offre un bon compromis en termes de précision et de temps de calcul. De plus, elle permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, et les défauts de type rupture de barre rotorique [20]. Nous présentons en premier lieu les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant le modèle de la machine. La simulation de modèle est alors fondée sur l'intégration numérique d'une représentation d'état de la machine qui nécessite l'expression analytique de l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution de la machine et son alimentation .

II.2. Différentes méthodes de modélisations des machines électriques

II.2.1 La méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC)

La méthode de (CEMC) permet d'exprimer les principes physiques mis en jeu lors de la conversion électromécaniques, sous forme de relations analytiques liant les tensions, les courants et les flux à travers les résistances et les inductances. Bien que les résultats obtenus sont généralement acceptables, ils présentent des insuffisances à cause des hypothèses simplificatrices restrictifs telles que, la linéarité des matériaux, configurations géométriques simples, l'absence de saturation magnétique et d'effet de peau. Dans les applications que ne nécessitent pas une très grand précision, la méthode des (CEMC) est avantageuse en termes de sa simplicité de mise en œuvre basée principalement sur les lois fondamentales de la physique, d'une part et d'une autre part, de sa souplesse lors de son implémentation dans les logiciels de calcul numérique [3].

II.2.2 La méthode des éléments finis (MEF)

Dans l'approche numérique la méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution des équations du champ électromagnétique incluant les propriétés réelles des matériaux et les configurations géométriques complexes. La discrétisation ou le maillage fin du domaine d'étude permet d'augmenter la précision des résultats. Néanmoins la (MEF) présente un inconvénient relatif aux ressources informatiques (temps et espace mémoire important) [11].

II.2.3 La méthode des réseaux de réluctances (MRR)

La méthode des réseaux de réluctances (MRR) basée sur les schémas équivalents magnétiques présente un niveau de complexité intermédiaire entre les deux méthodes (CEMC)-(MEF). Elle offre l'avantage de décrire plus finement les grandeurs du système à l'aide d'une représentation graphique de la géométrie de la machine, en incluant les phénomènes de saturations locales (générés par les aimants sur les dents du primaire). Cependant, la représentation très complexe des échanges d'énergie dans la zone d'entrefer reste un frein majeur à son utilisation [1].

II.3. Description de la machine asynchrone double étoiles (MASDE)

La machine asynchrone double étoile est composée de deux stators décalés entre eux d'un angle électrique $\alpha = 30^\circ$ et un rotor bobiné ou à cage d'écuriel, L'angle entre une phase statorique et une phase rotorique est θ .

Les enroulements du stator et du rotor ont le même nombre de pôles et sont alimentés par la même fréquence. La figure (II.1) donne les positions des axes magnétiques des neuf enroulements formant les neuf phases.

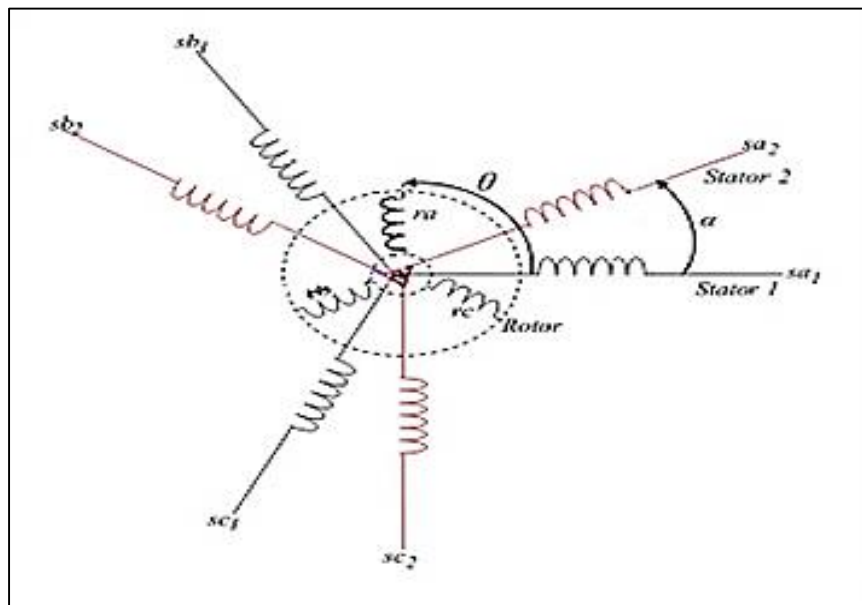


Figure II.1 : Représentation schématique de la MASDE.[22]

II.4. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone double étoile (MASDE), avec la répartition de ses enroulements et sa propre géométrie est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [22]:

- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer uniforme (effets d'encoches négligés)
- La machine est de constitution symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés.

II.5. Modèle de la MASDE dans le repère naturel

II.5.1. Equations électriques

En tenant compte de la représentation de la Figure (II.1) et les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, les équations de la machine s'écrivent comme suit :

On notera d'un indice « 1 » les grandeurs relatives à la 1^{ère} étoile (ou stator 1) et d'un indice « 2 » celles relatives à la 2^{ème} étoile (ou stator).

- **Pour l'étoile 1**

$$\begin{cases} V_{as1} = R_s I_{as1} + \frac{d\phi_{sa1}}{dt} \\ V_{bs1} = R_s I_{bs1} + \frac{d\phi_{sb1}}{dt} \\ V_{cs1} = R_s I_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

- **Pour l'étoile 2**

$$\begin{cases} V_{as2} = R_s I_{as2} + \frac{d\phi_{sa2}}{dt} \\ V_{bs2} = R_s I_{bs2} + \frac{d\phi_{sb2}}{dt} \\ V_{cs2} = R_s I_{cs2} + \frac{d\phi_{sc2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

- **Pour le rotor**

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} = 0 \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Ces équations sont données sous formes matricielles condensées suivantes :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V^s] \\ [V^r] \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} [R_{ss}] & [0] \\ [0] & [R_{rr}] \end{pmatrix} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi^s \\ \varphi^r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi^s \\ \varphi^r \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{sr}(\theta)]^{tr} & [L_{rr}] \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I^s \\ I^r \end{bmatrix} = [L][I] \quad (\text{II.5})$$

Avec

$$[V^s] = \begin{bmatrix} V_{a1}^s \\ V_{b1}^s \\ V_{c1}^s \\ V_{a2}^s \\ V_{b2}^s \\ V_{c2}^s \end{bmatrix} \quad [V^r] = \begin{bmatrix} V_A^r \\ V_B^r \\ V_C^r \end{bmatrix} \quad [V] = \begin{bmatrix} [V^s] \\ [V^r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[I^s] = \begin{bmatrix} I_{a1}^s \\ I_{b1}^s \\ I_{c1}^s \\ I_{a2}^s \\ I_{b2}^s \\ I_{c2}^s \end{bmatrix} \quad [I^r] = \begin{bmatrix} I_A^r \\ I_B^r \\ I_C^r \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[\varphi^s] = \begin{bmatrix} \varphi_{a1}^s \\ \varphi_{b1}^s \\ \varphi_{c1}^s \\ \varphi_{a2}^s \\ \varphi_{b2}^s \\ \varphi_{c2}^s \end{bmatrix} \quad [\varphi^r] = \begin{bmatrix} \varphi_A^r \\ \varphi_B^r \\ \varphi_C^r \end{bmatrix} \quad [\varphi] = \begin{bmatrix} [\varphi^s] \\ [\varphi^r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec

- $[V^s]$ Vecteur de tensions statoriques
- $[V^r]$ Vecteur de tensions rotoriques
- $[I^s]$ Vecteur de courants statoriques
- $[I^r]$ Vecteur de courants rotoriques
- $[\varphi^s]$ Vecteur de flux statoriques
- $[\varphi^r]$ Vecteur de flux rotoriques

La matrice des inductances mutuelles rotor-stator s'écrit comme suit :

$$[M_{rs}(\theta)] = m_{rs} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \beta) & \cos(\theta + \beta) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - (\alpha + \beta)) & \cos(\theta - (\alpha - \beta)) \\ \cos(\theta + \beta) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \beta) & \cos(\theta - (\alpha - \beta)) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - (\alpha + \beta)) \\ \cos(\theta - \beta) & \cos(\theta + \beta) & \cos(\theta) & \cos(\theta - (\alpha + \beta)) & \cos(\theta - (\alpha - \beta)) & \cos(\theta - \alpha) \end{bmatrix}$$

Les matrices résistances statoriques et rotoriques sont données :

$$[R_{ss}] = \begin{bmatrix} R_{a1}^s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{b1}^s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{c1}^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{a2}^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{b2}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{c2}^s \end{bmatrix} \quad [R_{rr}] = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi que les inductances propres et mutuelles entre les phases statoriques sont exprimées comme suit :

$$[L_{ss}] = m_{ss} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\beta) & \cos(-\beta) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \beta) & \cos(\alpha - \beta) \\ \cos(-\beta) & 1 & \cos(\beta) & \cos(\alpha - \beta) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \beta) \\ \cos(\beta) & \cos(-\beta) & 1 & \cos(\alpha + \beta) & \cos(\alpha - \beta) & \cos(\alpha) \\ \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \beta) & \cos(\alpha + \beta) & 1 & \cos(\beta) & \cos(-\beta) \\ \cos(\alpha + \beta) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \beta) & \cos(-\beta) & 1 & \cos(\beta) \\ \cos(\alpha - \beta) & \cos(\alpha + \beta) & \cos(\alpha) & \cos(\beta) & \cos(-\beta) & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{a1}^s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{b1}^s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{c1}^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{a2}^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{b2}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{c2}^s \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Les inductances propres et mutuelles entre les phases rotoriques

$$L_r = m_{rr} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\beta) & \cos(\beta) \\ \cos(\beta) & 1 & \cos(\beta) \\ \cos(\beta) & \cos(\beta) & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ra} & 1 & 1 \\ 1 & L_{rb} & 1 \\ 1 & 1 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

II.5.2. Equation mécanique

L'équation mécanique qui régit le fonctionnement de la machine peut se mettre sous la forme suivante

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.13})$$

II.5.3. Expression du couple électromagnétique

Le calcul de couple électromagnétique est déterminé en étudiant la Co-énergie magnétique donnée par l'équation :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$C_{em} = \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} = p \cdot \frac{1}{2} [I_s] \left(\frac{\partial [M_{sr}(\theta_r)]}{\partial \theta_r} \right) [I_r] \quad (\text{II.15})$$

II.5.4. Equation D'état

Après le réassemblage des matrices.(II.8) (II.9) (II.6) (II.7)on obtient le modelé d'Etat de la MASDE :

$$\begin{pmatrix} [V^s] \\ [V^r] \\ -C_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{rs}(\theta)] & [0] & [0] \\ [M_{rs}(\theta)]^T & [L_{rr}] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & J & 0 \\ [0] & [0] & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_{ss}] & [Mb_{sr}] & [0] & [0] \\ [Mb_{sr}]^T & [R_{rr}] & [0] & [0] \\ [C_s] & [C_r] & J & 0 \\ [0] & [0] & 0 & -1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$[M_{sr}(\theta)] = m_{sr} \begin{bmatrix} f_1^{s1} & f_2^{s1} & f_3^{s1} & f_1^{s2} & f_2^{s2} & f_3^{s2} \\ f_3^{s1} & f_1^{s1} & f_2^{s1} & f_3^{s2} & f_1^{s2} & f_2^{s2} \\ f_2^{s1} & f_3^{s1} & f_1^{s1} & f_2^{s2} & f_3^{s2} & f_1^{s2} \end{bmatrix}$$

$$f_i^{s1} = \cos(\theta_r + \beta(i-1)) \quad \text{et} \quad f_i^{s2} = \cos(\theta_r - \alpha + \beta(i-1))$$

Avec : $i = 1 \dots 3$

La matrice des dérivés des mutuelles stator-rotor s'écrit :

$$[Mb_{sr}] = \omega_r \left[m_{rs} \frac{d[Mm_{rs}(\theta)]}{d\theta} \right] = m_{sr} \begin{bmatrix} g_1^{s1} & g_2^{s1} & g_3^{s1} & g_1^{s2} & g_2^{s2} & g_3^{s2} \\ g_3^{s1} & g_1^{s1} & g_2^{s1} & g_3^{s2} & g_1^{s2} & g_2^{s2} \\ g_2^{s1} & g_3^{s1} & g_1^{s1} & g_2^{s2} & g_3^{s2} & g_1^{s2} \end{bmatrix}$$

Avec

$$g_i^{s1} = \frac{d}{d\theta_r} (f_i^{s1}) \quad \text{et} \quad g_i^{s2} = \frac{d}{d\theta_r} (f_i^{s2})$$

Et $i = 1 \dots 3$

$$[C_s] = \left(\frac{m_{rs}}{2}\right) [H]^{tr} \cdot [I^r]$$

$$[C_r] = \left(\frac{m_{rs}}{2}\right) [H] \cdot [I^s]$$

Avec

$$[H] = \begin{bmatrix} h_1^{s1} & h_2^{s1} & h_3^{s1} & h_1^{s2} & h_2^{s2} & h_3^{s2} \\ h_3^{s1} & h_1^{s1} & h_2^{s1} & h_3^{s2} & h_1^{s2} & h_2^{s2} \\ h_2^{s1} & h_3^{s1} & h_1^{s1} & h_2^{s2} & h_3^{s2} & h_1^{s2} \end{bmatrix}$$

Et

$$h_i^{s1} = \sin(\theta_r + \beta(i - 1))$$

$$h_i^{s2} = \sin(\theta_r - \alpha + \beta(i - 1))$$

Avec :

$$i = 1 \dots \dots 3$$

II.6. Simulation et interprétation résultats

Après avoir décrit le modèle de la MASDE, un programme écrit sous l'environnement Matlab nous a permis de mettre en évidence le comportement de la machine pour la résolution du système différentiel (II.14) nous avons utilisé la méthode Rung-kutta, les paramètres de la machine sont donnés en annexe.

II.6.1. Résultat simulation

Les résultats obtenus seront en fonctionnement à vide et en charge de la MASDE

II.6.1.1 Fonctionnement à vide

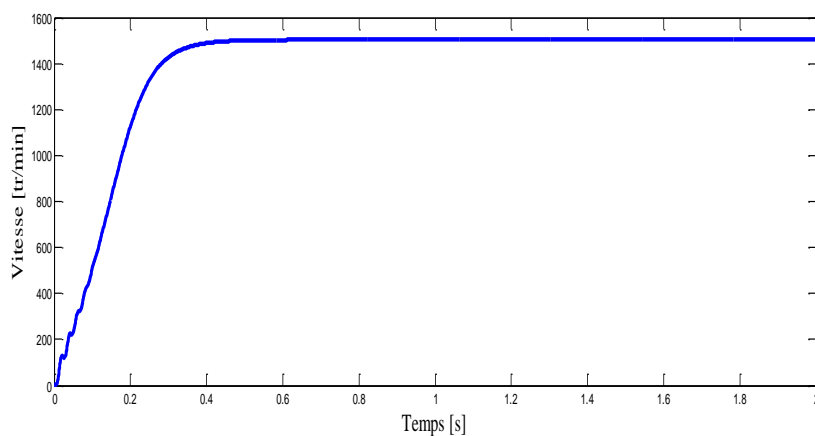


Figure (II.2) : Vitesse de rotation

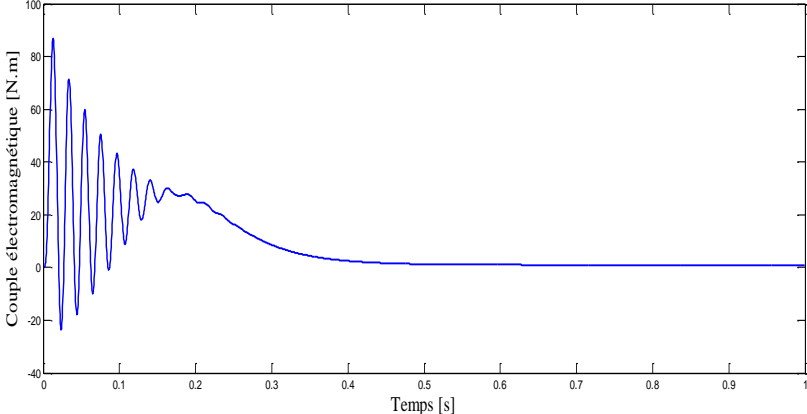


Figure (II.3) : Couple électromagnétique

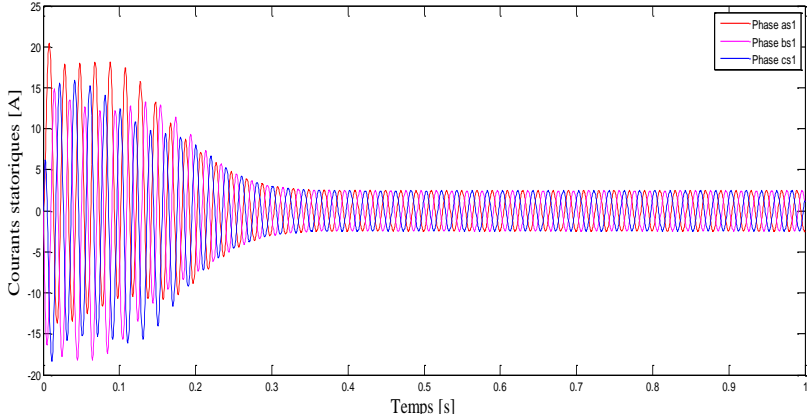


Figure (II.4) : Courants statoriques (1^{er} étoile)

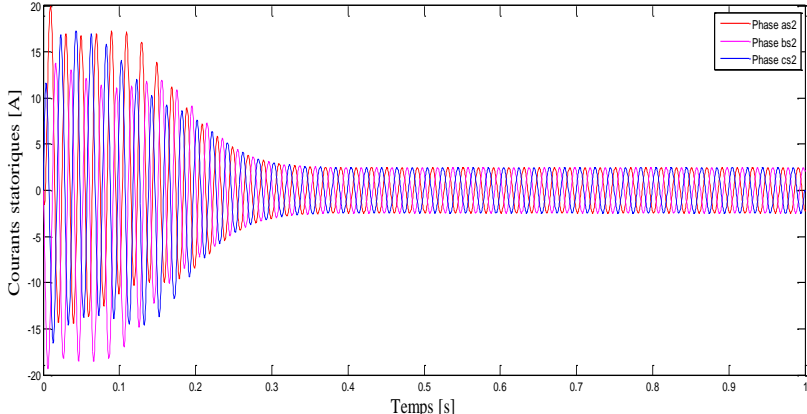


Figure (II.5) : Courants statoriques (2^èm étoile)

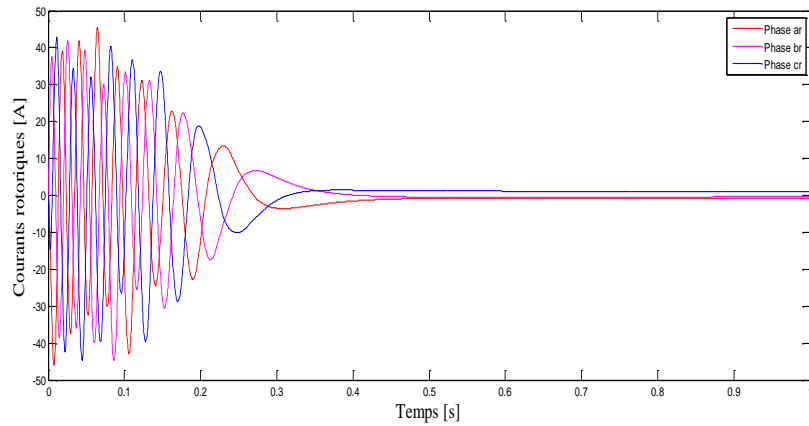


Figure (II.6) : Courants rotoriques

II.6.1.2 Fonctionnement en charge

Un couple résistant $C_r=15[N.m]$ a été appliqué à une instante $t=1$ s, et les résultats sont représentés dans les figures suivantes

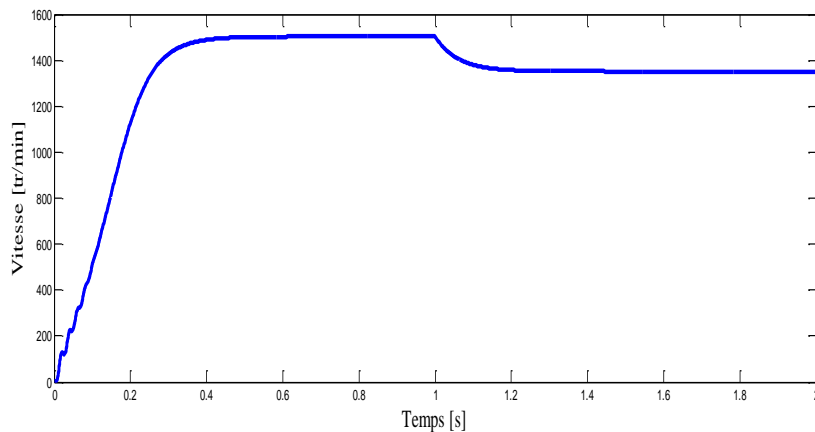


Figure (II.7) : Vitesse de rotation en charge

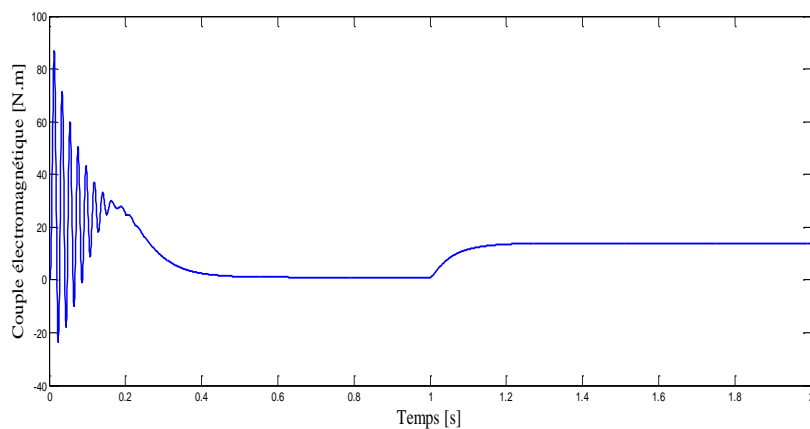


Figure (II.8) : Couple électromagnétique en charge

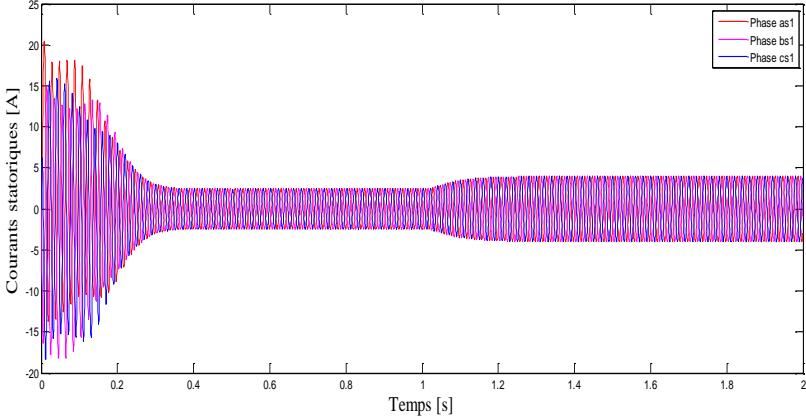


Figure (II.9) : Courants statorique (1^{er} étoile)

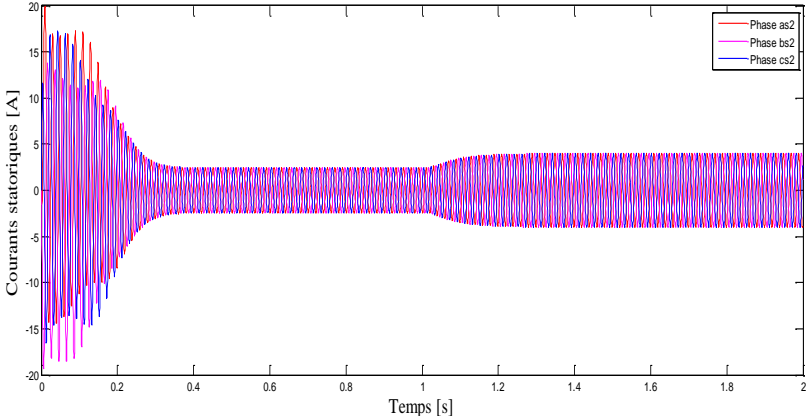


Figure (II.10) : Courants statoriques (2^{ème} étoile)

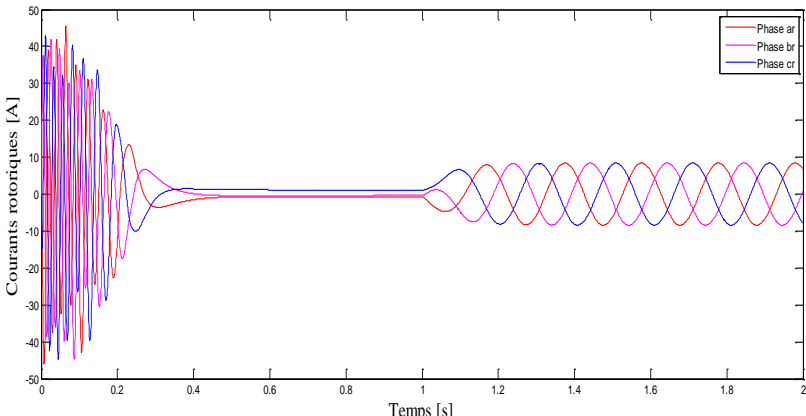


Figure (II.11) : Courants rotoriques en charge

II.6.2. Interprétation du résultat de la simulation

Au démarrage les courants statoriques passent par un régime transitoire, Puis ils se stabilisent à une valeur de 2.45A figure (II.5) et(II.4), à l'instant d'application le couple résistant($C_r=15$ N.m) l'amplitude de courants augmente jusque a 3.2Afigure(II.9) et(II.10).

Le couple électromagnétique au démarrage atteint une valeur maximale de 87 N.m, En régime permanent le couple se stabilise, pour équilibrer le couple résistant figure (II.8).

La figure (II.1) Présente la vitesse de rotation, au début l'augmentation est linéaire et se stabilise à une valeur légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme, En charge cette valeur décroît puisqu' elle est inversement proportionnelle à la charge, elle se stabilise à une valeur 1352 tr/min, figure (II.7).

Pendant le passage du régime transitoire, les courants rotoriques oscillent autour d'une valeur de 45.5 [A], puis les courants chutent à une valeur presque nulle, figure (II.6),à partir de $t=1$ s, lorsqu'on applique un couple résistants $C_r=15$ N.m, l'amplitude augmente jusqu'à 5.8 [A], figure (II.11).

II.7. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation de la machine asynchrone double étoile par la méthode de **Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC)** dans le repère naturel en régime sain, à travers la mise en équations des relations électriques, magnétiques et mécaniques en tenant compte d'hypothèses simplificatrices. Cette mise en équations différentielles nous conduit à une représentation sous forme modèle d'état, dont la résolution permet l'observation et l'analyse des différentes grandeurs électriques (courant dans les enroulements), mécanique (vitesse de rotation, position angulaire de rotor, couple électromagnétique) et magnétique (flux).

Chapitre III

Modélisation et simulation de la MASDE
avec un défaut de court-circuit entre- spires
statoriques

III.1. Introduction

Malgré les qualités des machines asynchrones, elles peuvent parfois présenter au stator et / ou rotor différents types de défauts provoquant un vieillissement prématuré. La recherche des signatures ou indicateurs de ces défauts a pour but de caractériser le fonctionnement de la machine en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts, ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalie survenant au différent niveau de la machine [20]. Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle sont cependant différents, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles spécifiquement dédiés à la simulation des défauts [20]. L'objectif de cette partie est l'élaboration d'un modèle de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence de défaut de court-circuit entre-spires sur la même phase du stator, ce défaut peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines (croisement des faisceaux) soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution de nombre de spires de la bobine. [15]

III.2 Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne

Lorsqu'un court-circuit entre spires apparaît, l'application du théorème d'Ampère montre qu'il se crée en plus du champ principal, une excitation magnétique de pulsation ω_s due au nouveau bobinage court-circuité parcouru par un courant dit de court-circuit. C'est l'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique qui crée les ondulations du couple et qui induit au stator des forces magnétomotrices de fréquence $2.f_s$, d'où des courants statoriques comportant ces composantes.

Ces courants circulant dans les circuits magnétiques et en présence de défaut induisent, par conséquent, des courants de fréquence $3.f_s$ selon le même processus. Ainsi des composantes aux fréquences $k.f_s$ (ou k est un entier positif) se retrouvent dans les courants statoriques [21]. Pour le cas d'une machine saine à p paires de pôles, lorsque les trois bobinages statoriques sont parcourus par un système sinusoïdal de tension de pulsation $\omega_s = 2\pi.f_s$, il se crée alors trois excitations magnétiques stationnaires dirigées selon l'axe de chaque phase. C'est la somme de ces excitations qui crée un champ tournant dans l'entrefer proportionnel à l'amplitude des courants et dont l'expression au point M repéré par un angle θ est donnée :

$$H(\theta, t) = H_a(\theta, t) + H_b(\theta, t) + H_c(\theta, t) = \frac{3}{2} H_m \cos(\omega_s t - p\theta) \quad (\text{III.1})$$

Il s'agit d'une onde sinusoïdale progressive d'amplitude constante de p période sur un tour

complet, tournant à $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ par rapport au bobinage triphasé qui le crée. Le flux généré balaye les bobinages rotoriques, ce qui provoque la rotation de l'arbre du moteur. La vitesse augmente et atteint une vitesse Ω_r inférieure à la vitesse de synchronisme Ω_s . Les enroulements rotoriques sont alors balayés par le flux à la vitesse de glissement $\Omega_s - \Omega_r = g\Omega_s$. A la suite d'un court-circuit, apparaissent des vibrations et des oscillations de couple synonymes à la présence de nouvelles composantes dans le couple électromagnétique, et par conséquent dans les courants statoriques. En effet, un court-circuit de spires est à l'origine d'un nouveau bobinage monophasé du stator traversé par un fort courant, il en résulte un champ magnétique additionnel dans la machine de fréquence $\pm f_s$ (ou f_s est la fréquence de synchronisme). Ces composantes entraînent des harmoniques de fréquences $k.f_s$ dans les courants absorbés. [21][15]

III.3 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné avec défaut de court-circuit

Le stator et le rotor sont toujours constitués de six phases identiques parcourues par des courants. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire dite de court-circuit dont le nombre de spires η_{cc} est égale au nombre de spires en défaut dans la machine. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages statoriques d'axes a_{s1}, b_{s1}, c_{s1} et rotoriques d'axes a_r, b_r, c_r , un bobinage court-circuité B_{cc} parcouru par un courant de court-circuit à l'origine du champ stationnaire H_{cc} par rapport au stator, créé en situation de défaut. (Fig.III.1).

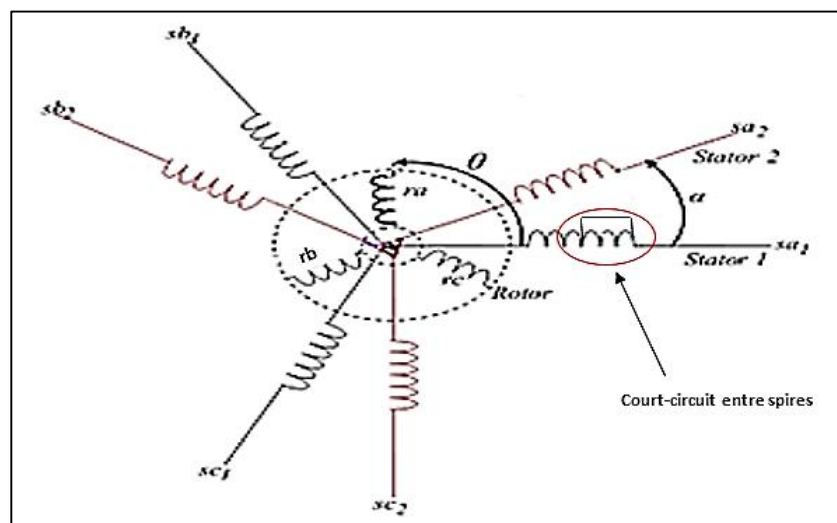


Figure III.1 : La MASDE en présence du défaut de court-circuit entre spires à la 1ère étoile.

On constate que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} . Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

- L'angle électrique, noté θ_{cc} , repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs

$$\theta_{cc} = \begin{cases} 0 & \text{phase } as1 \\ \beta & \text{phase } bs1 \\ -\beta & \text{phase } cs1 \\ \alpha & \text{phase } as2 \\ \alpha + \beta & \text{phase } bs2 \\ \alpha - \beta & \text{phase } cs2 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

- Le rapport de court-circuit noté η_{cc} égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut.

$$\eta_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s} \quad (\text{III.3})$$

III.4. Modèle de la MASDE avec un court-circuit dans la 1^{ère} étoile

III.4.1. Equations électriques

En tenant compte de la figure (III.1) et des hypothèses simplificatrices citées au 2^{èm} chapitre, les équations de la machine s'écrivent comme suit :

- **Pour l'étoile 1**

$$\begin{cases} V_{as1cc} = R_s I_{as1} + \frac{d\phi_{sa1cc}}{dt} \\ V_{bs1cc} = R_s I_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1cc}}{dt} \\ V_{cs1} = R_s I_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1cc}}{dt} \\ V_{cc1} = R_{cc1} I_{cc1} + \frac{d\phi_{cc1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- **Pour l'étoile2**

$$\begin{cases} V_{as2} = R_s I_{as2} + \frac{d\phi_{sa2cc}}{dt} \\ V_{bs2cc} = R_s I_{bs2} + \frac{d\phi_{sb2cc}}{dt} \\ V_{cs2cc} = R_s I_{cs2} + \frac{d\phi_{sc2cc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

- **Pour le rotor**

$$\begin{cases} V_{arcc} = R_r I_{ar} + \frac{d\phi_{racc}}{dt} \\ V_{brcc} = R_r I_{br} + \frac{d\phi_{brcc}}{dt} \\ V_{crcc} = R_r I_{cr} + \frac{d\phi_{crcc}}{dt} \end{cases} \quad (III.6)$$

Ces équations données sous condensées suivantes

$$[V] = \begin{bmatrix} [V^s] \\ [V^r] \\ [V^s_{cc}] \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} [R_{SS}] & [0] & [0] \\ [0] & [R_{rr}] & [0] \\ [0] & [0] & [R_{cc}] \end{pmatrix} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \\ [I^s_{cc}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \\ [\phi^s_{cc}] \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Avec.

$$[\phi_s] = \{[L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r]\} + [M_{scc}]i_{cc}$$

$$[\phi_r] = \{[L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s]\} + [M_{rcc}]i_{cc}$$

$$[\phi_{cc}] = \{[L_{cc}][I_{cc}] + [M_{ccs}][I_s]\} + [M_{ccr}]i_r$$

Les matrices $[L_s]$, $[L_r]$, $[M_{sr}]$ sont définies au chapitre II .

III.4.2. Matrices des inductances mutuelles entre la phase en court-circuit et les statoriques et rotoriques

- Matrice des inductances mutuelles entre la phase en cc et les phases statoriques

$$[M_{scc1}] = M_{ccs} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc} - \beta) \\ \cos(\theta_{cc} + \beta) \\ \cos(\theta_{cc} - \alpha) \\ \cos(\theta_{cc} - \alpha - \beta) \\ \cos(\theta_{cc} - \alpha + \beta) \end{pmatrix} \quad (III.8)$$

$$[M_{ccs1}] = [M_{scc1}]^T$$

Matrice des inductances mutuelles entre les phases en court-circuit et les phases rotoriques

$$[M_{rcc1}] = M_{ccr} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{cc} - \theta) \\ \cos(\theta_{cc} - \theta - \beta) \\ \cos(\theta_{cc} - \theta + \beta) \end{pmatrix} \quad III.9$$

$$[M_{ccr1}] = [M_{rcc1}]^T$$

Matrice des dérivés des inductances mutuelles entre les phases en court-circuit et les phases rotoriques

$$[MM_{rcc1}] = M_{ccr} \omega_r \begin{pmatrix} \sin(\theta_{cc} - \theta) \\ \sin(\theta_{cc} - \theta - \beta) \\ \sin(\theta_{cc} - \theta + \beta) \end{pmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Après réassemblage la matrice L devient comme suit :

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr}(\theta) & M_{ccs1} \\ M_{rs}(\theta) & L_{rr} & M_{ccr1}(\theta) \\ M_{scc1} & M_{rcc1}(\theta) & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Avec

$$L_{cc} = n_{cc}^2 (m_{ss} + L_s)$$

n_{cc} : le coefficient de spires au court-circuit

L_{cc} : Inductance mutuelle propre de court-circuit

III.5. Equation D'état

Après le réassemblage on obtient un modèle d'état de la MASDE sous la forme suivant :

$$\begin{pmatrix} [V^s] \\ [V^r] \\ [V_{cc}^s] \\ -C_r \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [R_{ss}] & [Mb_{sr}] & [c_0]^T & [c_0]^T & [c_0]^T \\ [Mb_{sr}]^T & [R_{rr}] & [MM_{rc1}] & [cc_0]^T & [cc_0]^T \\ [C_0] & [M_{rcc1}] & [R_{cc}] & 0 & 0 \\ [C_{ss}] & [C_{rr}] & 0 & f_v & 0 \\ [c_0] & [cc_0] & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \\ [I_{cc}^s] \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & [A_0'] & [A_0] \\ [A_0] & jt & 0 \\ [A_0] & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I^s] \\ [I^r] \\ [I_{cc}^s] \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Avec la résistance de court-circuit :

$$R_{cc} = n_{cc} R_s$$

Et

$$[A_0] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$[A_0'] = [A_0]^T$$

III.6. Résultats de simulation

Le programme a été implémenté dans l'espace MATLAB écrit à partir d'un modèle générale du MASDE avec défaut d court-circuit entre spires statorique. La simulation va se faire sur un modèle de la MASDE avec un court-circuit entre spires dans la 1^{ère} étoile de 5% et 15% des spires d'une bobine

- Pour (5%) de spires en court-circuit

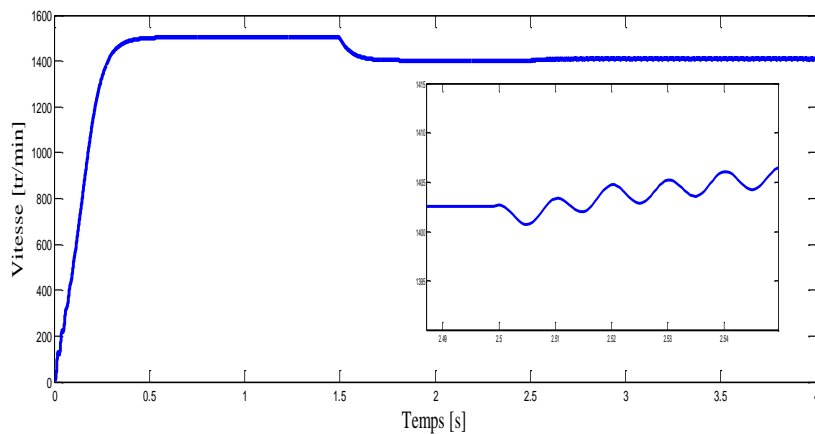


Figure III.2 : Vitesse de rotation.

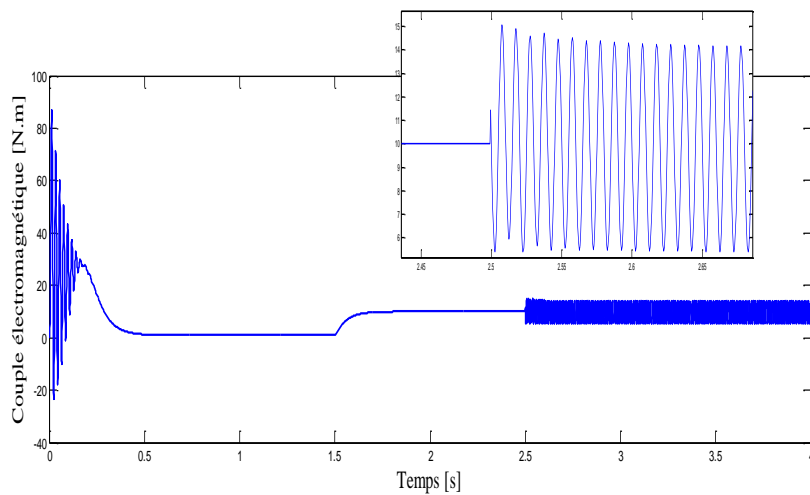


Figure III.3 : Couple électromagnétique.

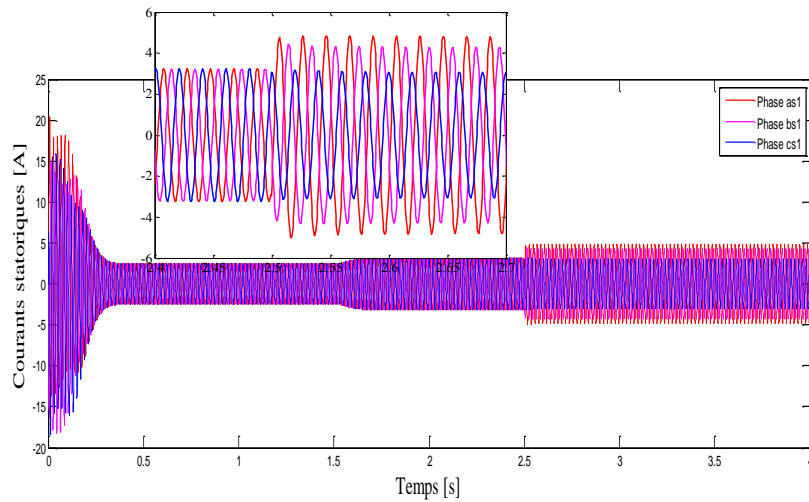


Figure III.4 : Courants statoriques (1^{er} étoile).

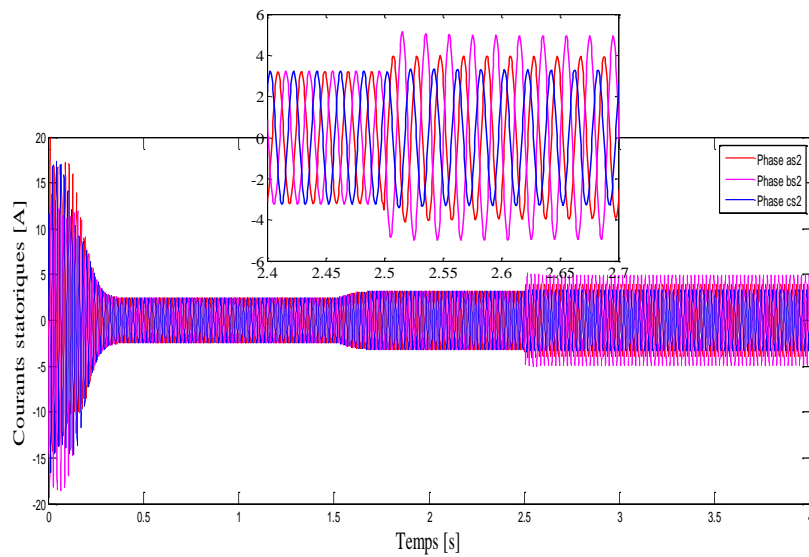


Figure III.5 : Courants statoriques (2^{em} étoile)

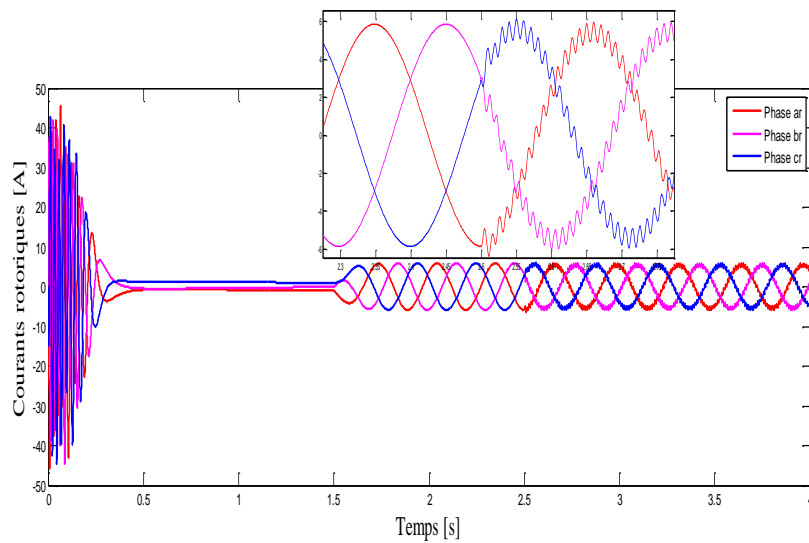


Figure III.6 : Courants rotoriques.

- Pour (10%) de spires en court-circuit

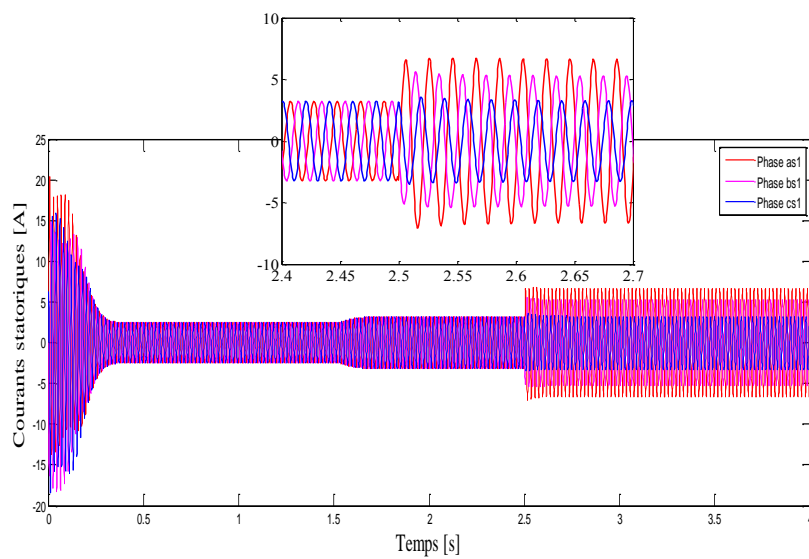
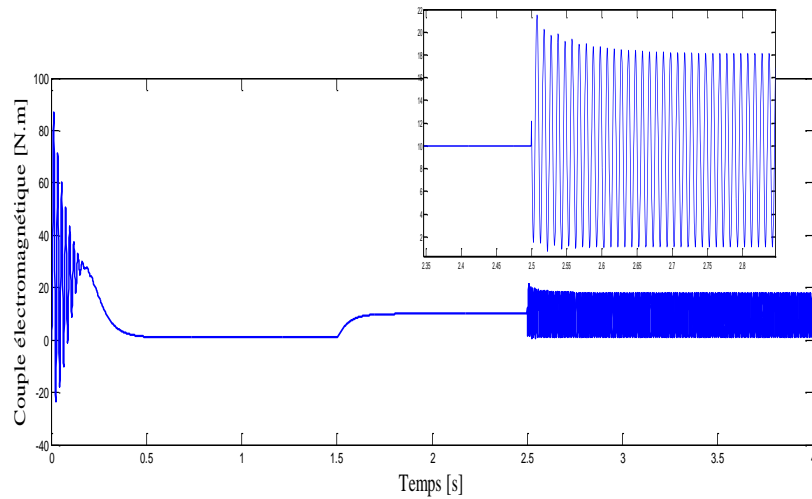
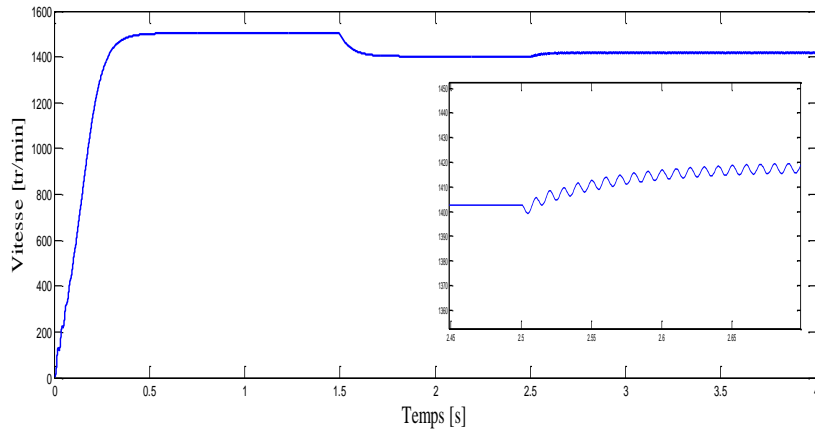
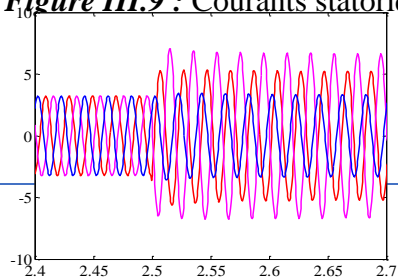


Figure III.9 : Courants statoriques (1^{er} étoile)



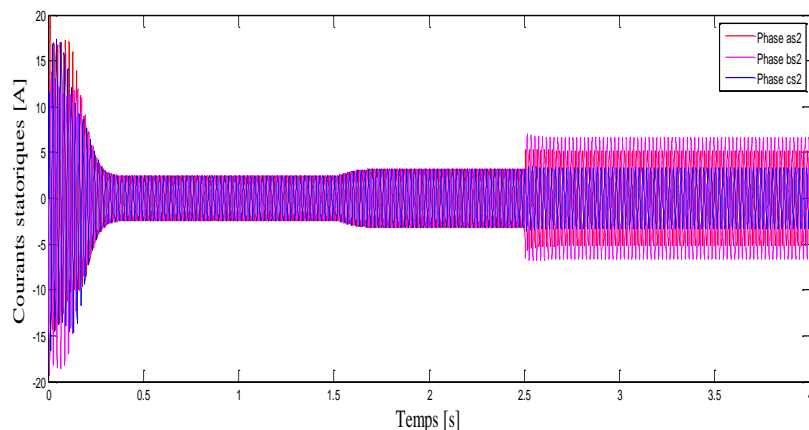


Figure III.10 : Courants statoriques (2^{em} étoile)

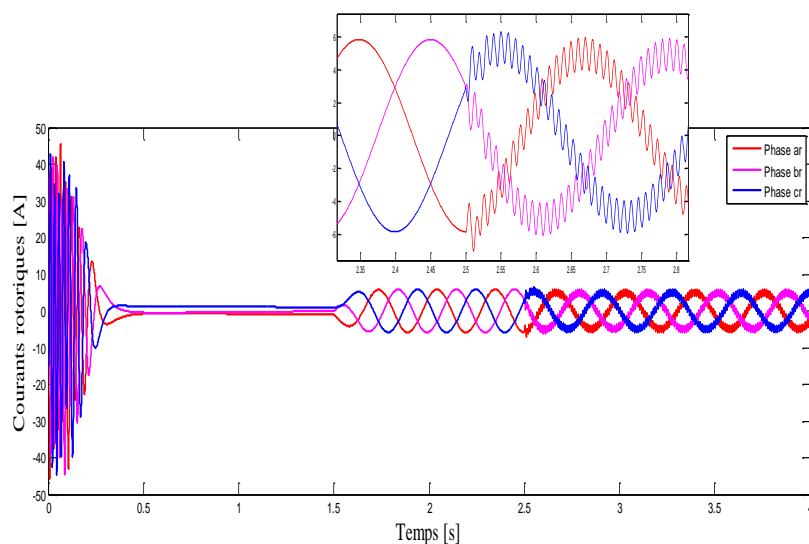


Figure III.11 : Courants rotoriques

- Pour (15%) des spires en court-circuit

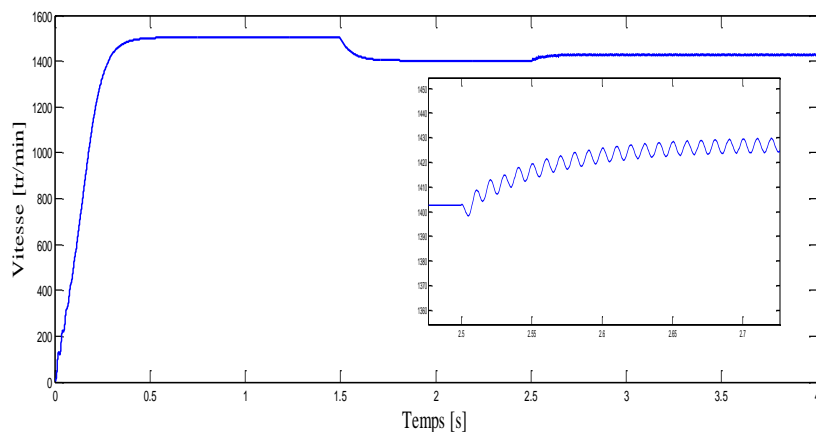


Figure III.12 : Vitesse de rotation

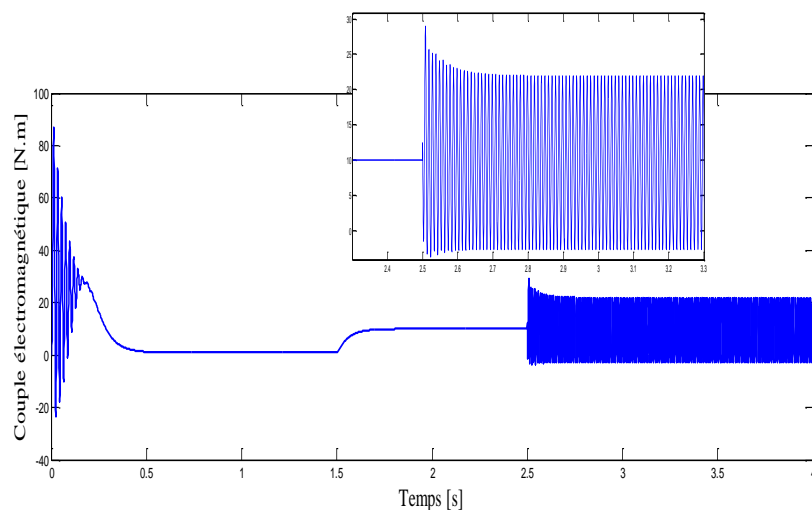


Figure III.13 : Couple électromagnétique

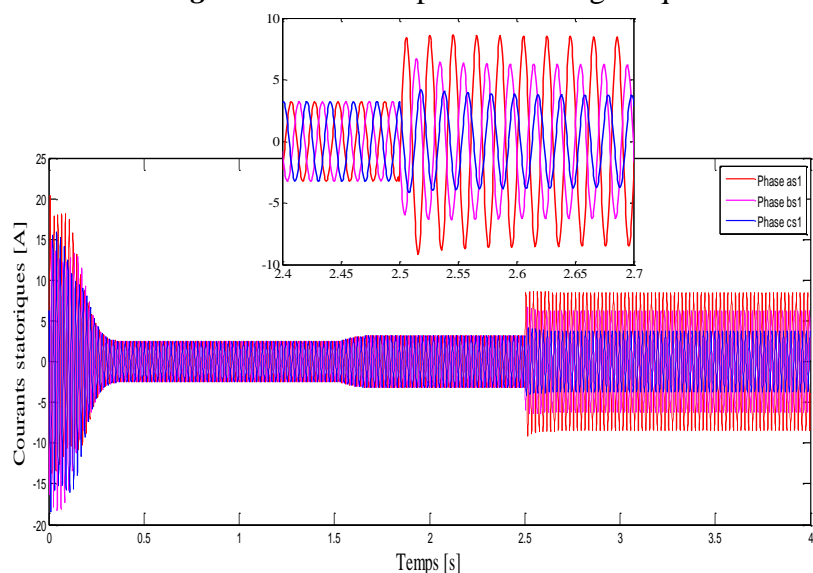


Figure III.14 : Courants statoriques (1^{er} étoile)

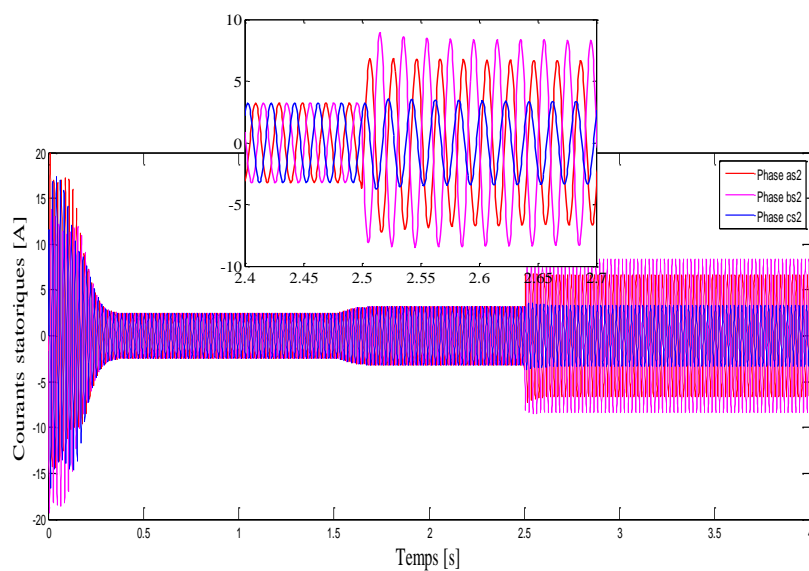


Figure III.15 : Courants statoriques (2^{em} étoile).

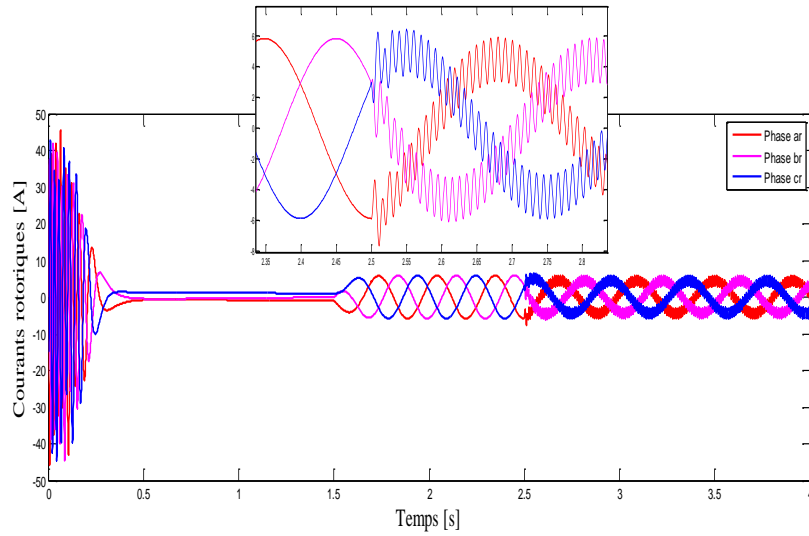


Figure III.16 : Courants rotoriques

III.6.1. court-circuit dans la deuxième étoile du stator

III.6.2. Résultats de la simulation

- Pour (5%) des spires en court-circuit

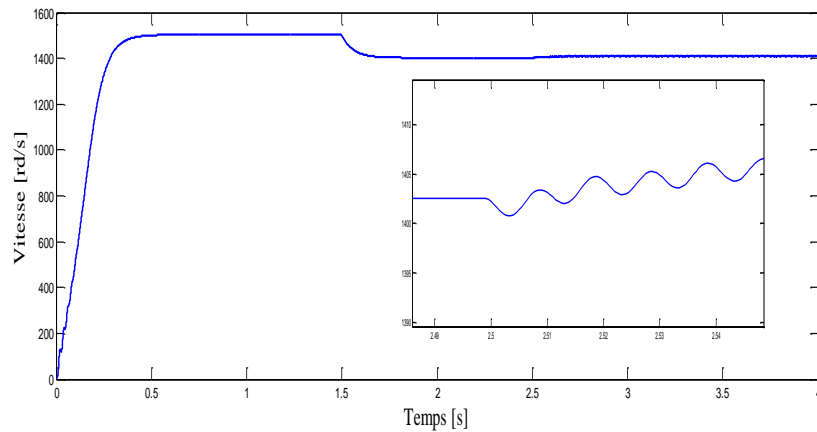


Figure III.17 : Vitesse de rotation

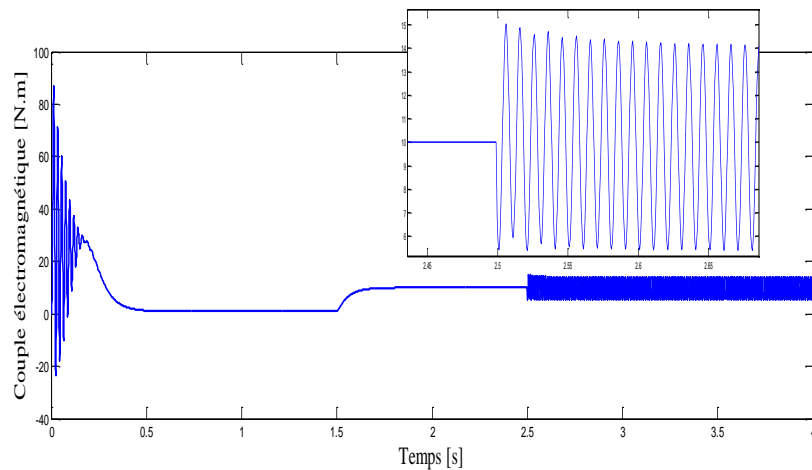


Figure III.18 : Couple électromagnétique

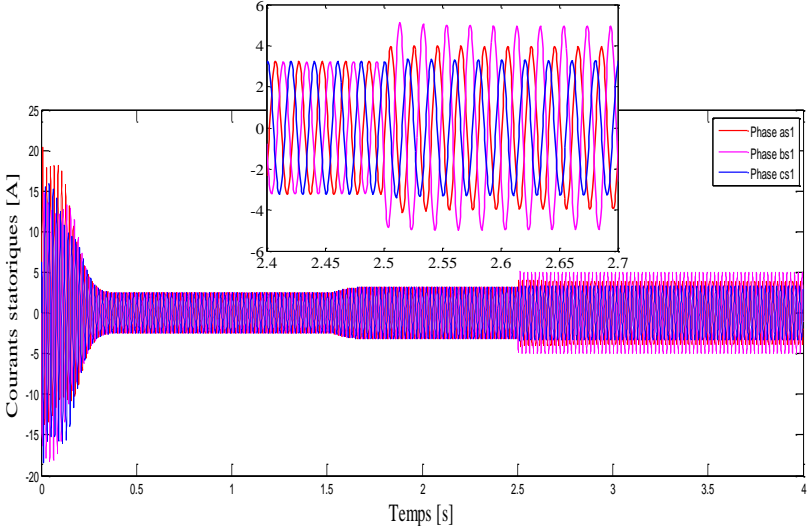


Figure III.19 : Courants statoriques (1^{er} étoile)

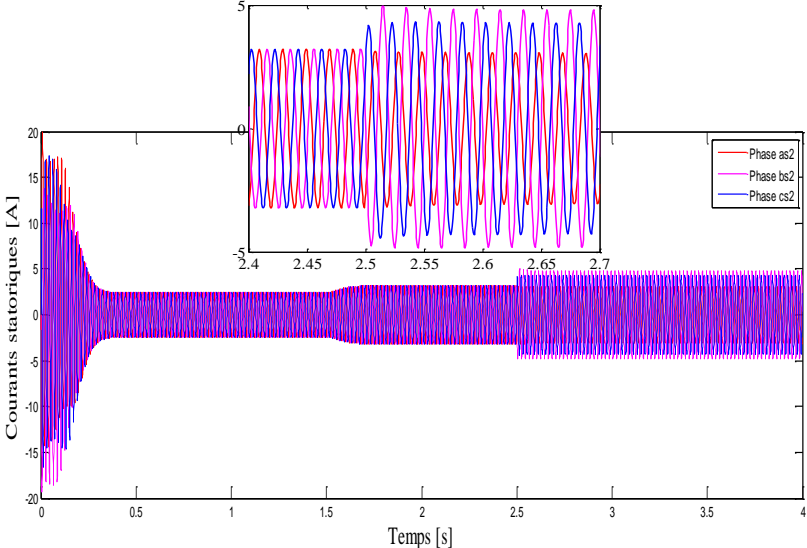


Figure III.20 : Courants statoriques (2^{ème} étoile)

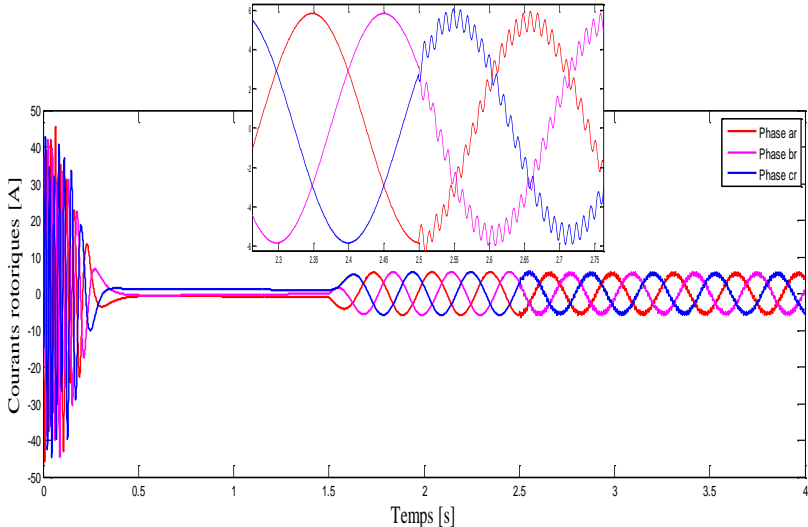


Figure III.21 : Courants rotoriques

- Pour (10%) des spires en court-circuit

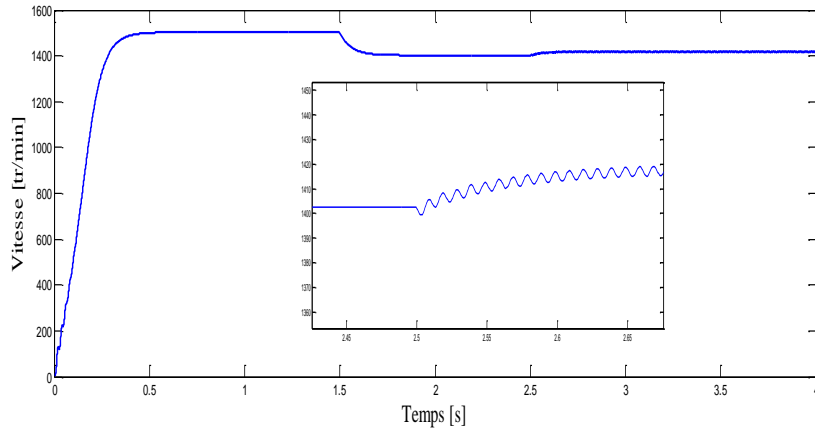


Figure III.22 : Vitesse de rotation

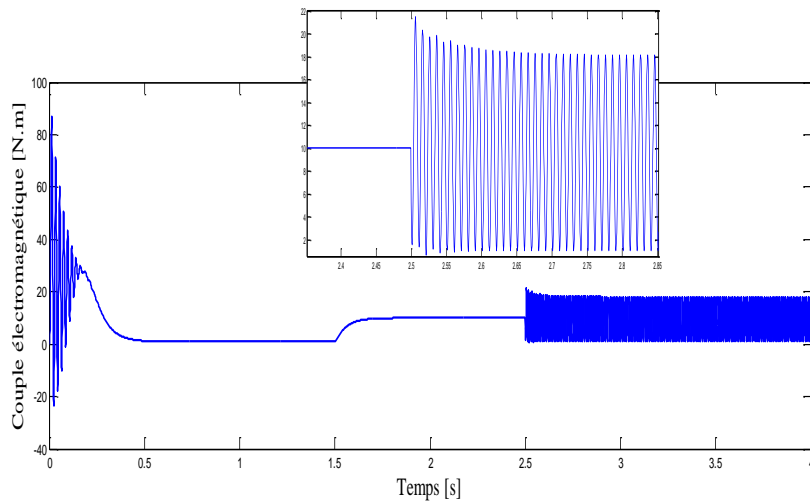


Figure III.23 : Couple électromagnétique

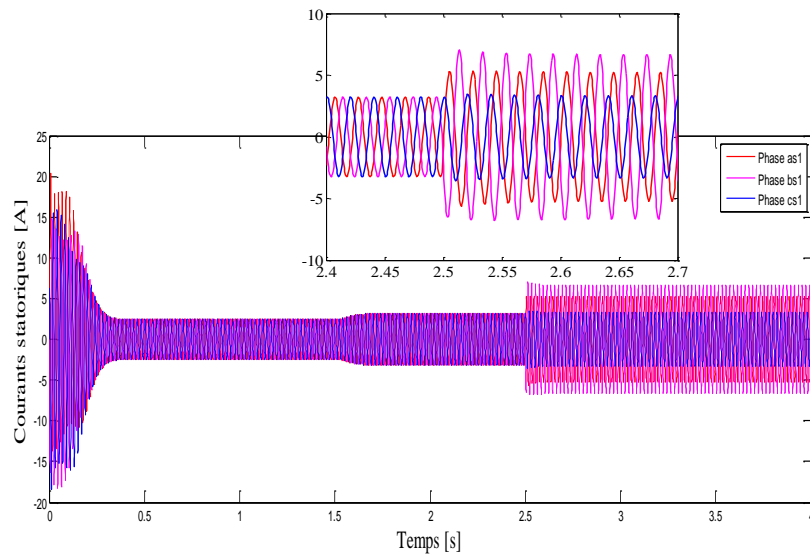


Figure III.24 : Courants statoriques (1^{er} étoile)

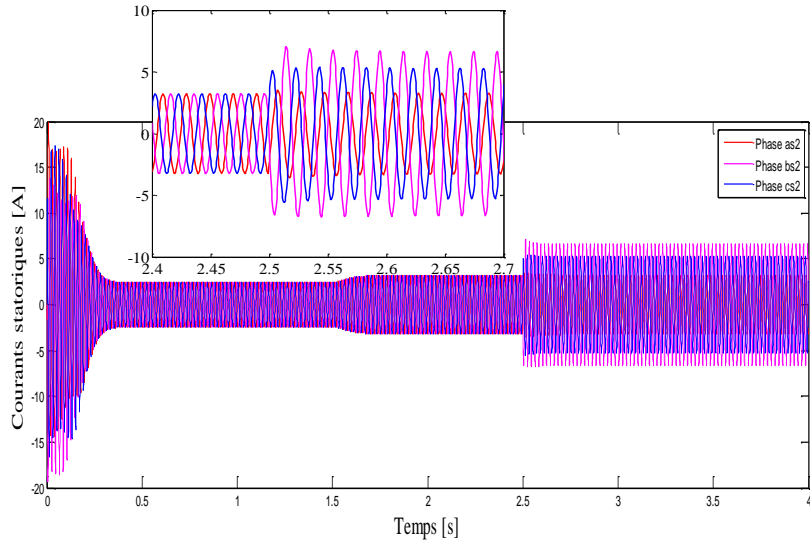


Figure III.25 : Courants statoriques (2^{ème} étoile)

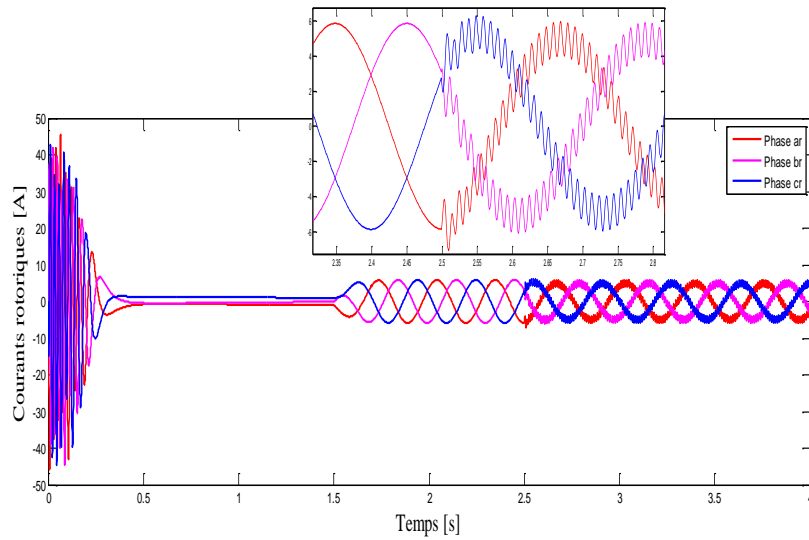


Figure III.26 : Courants rotoriques

- Pour (15%)des spires en court-circuit

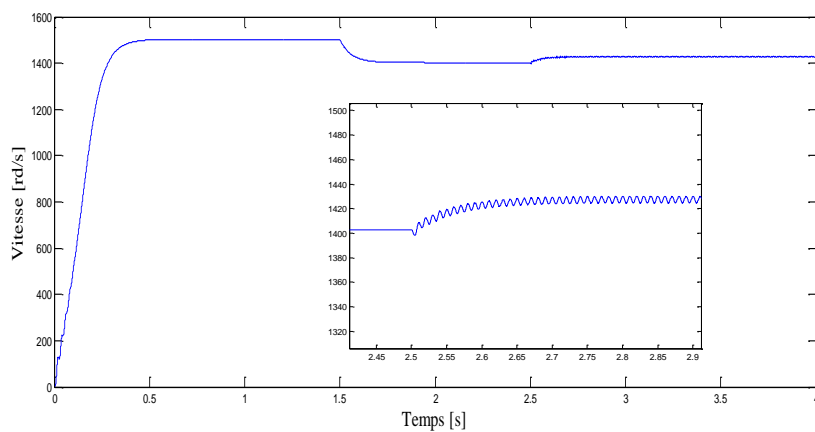


Figure III.27 : Vitesse de rotation

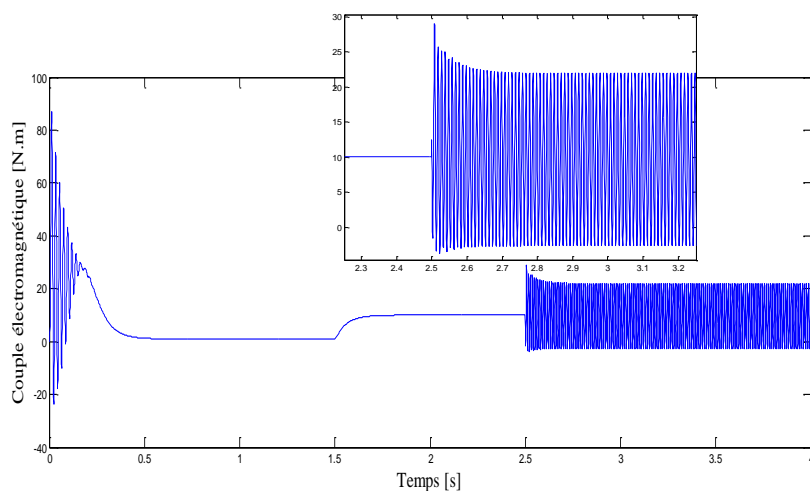


Figure III.28 : Couple électromagnétique

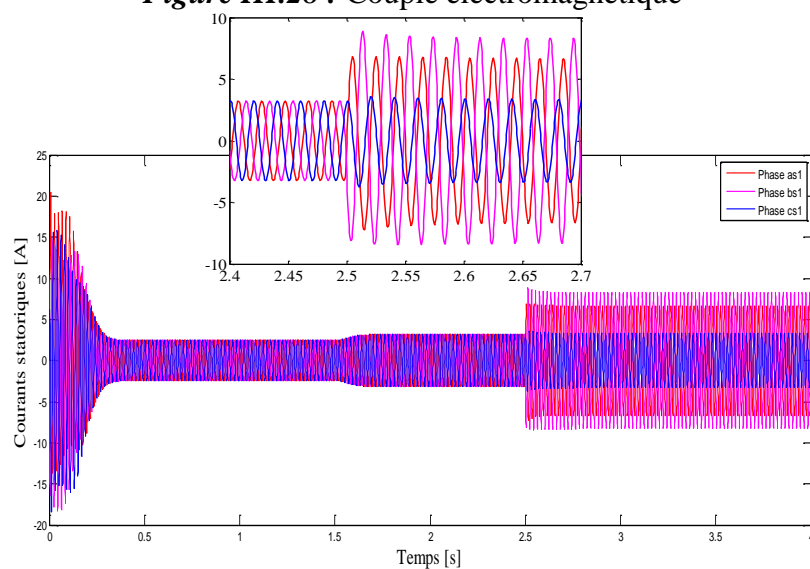


Figure III.29 : Courants statoriques (1^{er} étoile)

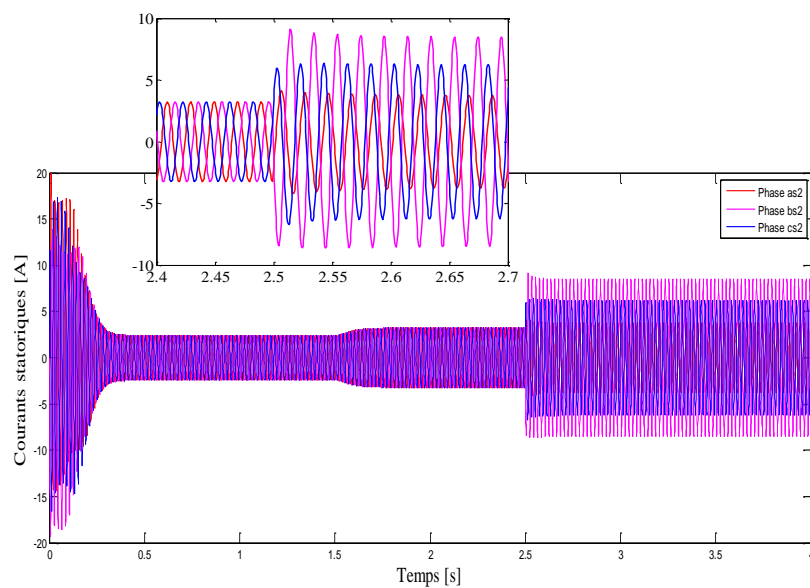


Figure III.30 : Courants statoriques (2^{ème} étoile)

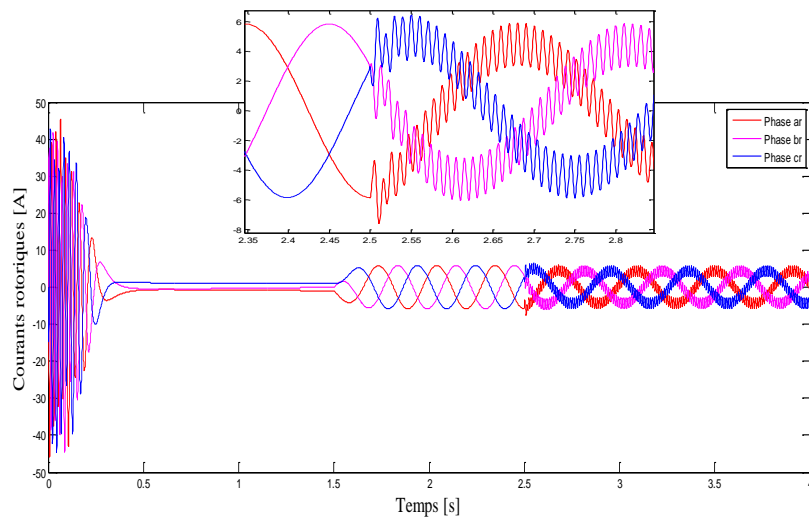


Figure III.31 : Courants rotoriques

III.6.3. Interprétation du résultat

À l'instant 2.5s on applique un court-circuit inter-spires de 5%, 10% et 15% sur le phase as1 (étoile 1) de stator de la machine, ensuite sur le phase bs2 du deuxième étoile.

La figure (III.2) représente l'allure de la vitesse de rotation, lors de l'application de défaut de 5% court-circuit, nous remarquons qu'à l'instant de l'apparition de ce défaut, la vitesse augmente et oscille avec des ondulations d'amplitude 2 rad/s causées par le défaut et atteindre une valeur de 1410 rad/s, ces ondulations croient en augmentant le nombre de spires en court-circuit (III.7 et III.12).

Le couple électromagnétique dans le cas de court-circuit est illustré dans la figure (III.3), en présence de défaut de 5%, le couple augmente brusquement pour atteindre une valeur maximale qui représente le pic de couple égale à 15.04 N.m nous remarquons que ces ondulations s'amplifient avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, comme c'est montré dans les figures (III.8 et III.13).

Les figures (III.4, III.5) représentent l'évolution des courants statoriques dans les phases de deux étoiles de stator lors d'un défaut de 5%, de court-circuit, les courants augmentent brusquement et oscillent autour de l'axe de zéros avec des ondulations d'amplitude ($i_{as1}=4.83A$, $i_{bs1}=4.43A$ et $i_{cs1}=3.18$) et ($i_{as2}=3.97A$, $i_{bs2}=5.14A$ et $i_{cs2}=3.34A$), ces valeurs augmentent avec l'augmentation du pourcentage du court-circuit à 10% et 15%.

Les courants rotoriques dans les trois phases du rotor à l'instant d'apparition de défaut, comme montré les figure (III.6, III.11, III.16) nous voyons une déformation de la forme des

courants, et une augmentation de l'amplitude, ces amplitude croient en augmentant le nombre de spires en court-circuit.

II.7.Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'élaboration de modèle de la machine asynchrone double étoile dédié à la simulation de défaut de court-circuit entre-spires sur une phase et deux statoriques, ce modèle est basé sur le principe des Circuits Electrique Magnétiquement Couplés (CEMC). Le défaut de court-circuit a été pris en compte en ajoutant une bobine supplémentaire, en effet, ce modèle nous a permis d'analyser l'influence de ce défaut sur les grandeurs de la machine tels que le courant, la vitesse et le couple.

Conclusion

Dans les applications industrielles, les machines électriques, nécessitent une détection rapide de leurs défaillances à cause de leurs utilisations fréquentes dans la plupart des domaines industriels alors la maintenance de ces machines justifie l'accent mis sur la recherche dans le diagnostic de défauts des entraînements électriques, notamment en vitesse variable.

Le travail présenté dans ce mémoire a traité l'étude des défauts statoriques pouvant survenir au sein des machines asynchrones double étoile. Ce domaine très vaste, ouvre de larges perspectives pour ces différents types de machine. L'étude des défauts a un double objectif :

- ✓ Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- ✓ Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce ces défauts.

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone double étoile qui met en évidence l'influence des défauts sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mis en jeu. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine, et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut, cette méthode coûteuse en temps de calcul, et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone. La seconde approche dite méthode des Circuits Electriques Magnétiquement couplés (*CEMC*), consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressée afin de disposer d'un modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes. Les défauts étudiés sont le court-circuit entre spires dans les phases statoriques.

Pour aborder cette étude, nous avons établi un état de l'art sur la constitution de la machine asynchrone double étoile en mettant l'accent sur les possibilités d'apparition des défauts tant au stator qu'au rotor ainsi que les divers outils utilisés pour la détection et le diagnostic des défauts et les différents types de maintenance. Nous nous sommes intéressés ensuite à la présentation d'un modèle réel de la machine asynchrone double étoile, en développant les différentes équations régissant le fonctionnement de la machine, une représentation d'état est

Conclusion

alors obtenue dont la résolution permet de retrouver l'évolution toutes les grandeurs de la machine. Un programme écrit sous MATLAB nous a permis de valider ce modèle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. Moussaoui, Y. Nekkouche, "modélisation des moteurs asynchrones polyphasés dédiée au diagnostic de court-circuit entre spires, application aux moteurs penta phases et double étoile", Mémoire d'ingénieur en Université MMTO, Alger, 2008.
- [2] Z. Tir, "Etude d'une machine asynchrone double étoile (modélisation, alimentation et commande)", Mémoire de master en université d'El-Oued, 2014.
- [3] H. Boaboud, R. Abbass "modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et des anneaux de court-circuit" Mémoire de master en Université AMOB, Algérie, 2016.
- [5] A. Ceban, "méthodologie globale de diagnostic des machines électriques", thèse de doctorat en Université d'Artois, France, 2 Février 2012.
- [6] W. T. Thomson "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel cage induction motors—past, present and future" in *Second IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives - SDEMPED '99*, Gijon, Spain, pp. 3-17, 1999.
- [7] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency versus Increased Reliability," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [8] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, "Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.
- [9] 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*, vol. 55, pp. 4238-4251, December 2008.
- [10] Groupe mécanique modélisation mathématique et numérique, cour enseigné en master ingénierie mathématique et mécanique en université de Caen, France 2010.
- [11] B. Nadjar, "modélisation basé sur la méthode de réseau de permiances en vue de l'optimisation de la machine synchrone à simple et à double excitations" "Thèse de doctorat en Université de Cachan, France, 2011.
-

Bibliographie

- [12] Cour enseigné en master électromécanique et systèmes de commande en université de Bouira, Algérie, 2017.
- [13] S. Belhamdi, "diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlé par défèrent type de commandes ", Thèse de doctorat en Université de Biskra, Algérie, 2014.
- [14] A. Lalouche, "Diagnostic des Machines Tournantes, Étude Numérique et Expérimentale", Mémoire Magister vol(154) ,2006.
- [15] C. Tassoni, F. Fillipeti, G. Franceschini, P. Vas, "Ai Technique in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effet" IEEE Transactions on Industry Application, Vol (34), pp 45-55, Jan/Feb 1998.
- [16] R. Bouseksou, "Modélisation Analytique des Machines Asynchrone Application au Diagnostic", Mémoire Magister en Université Menturi Constantin, 2007.
- [17] A. Abderrahim, "Grandeurs Non Invasives pour le Diagnostic des Machines Asynchrones", Mémoire Magister en université de Sétif, Alger, 2010 .
- [18] G. Didier, "Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillance", Thèse de Doctorat, Groupe de recherche en Électrotechnique et Électronique de Nancy Faculté des Science et techniques, 2004.
- [19] O.Ondel, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application a un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en École centrale de Lyon, France, 2006.
- [20] R. Casimir,C. Bouteleux,H.Yagoui,G. Clerc,H.Henao,C. Delmotte,G. Rostaing,J.P . Rognon, E. Foulon, L . Loron, H. Razik, G.Didier ,G . Houdouin, G. Barakt, B. Dakyo,S.Bachir,S.Tnani,G.Champenois,J.C.Ctrigeassou, "Comparaison de plusieurs méthodes de Modélisation de la Machine Asynchrone en Présence de Défauts ", Électrotechnique du Futur Vol(38),Décembre 2003.
- [21] S. Bachir, "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique", Thèse de doctorat en Université de Poitiers, France, Mars 1992.
- [22] M. lakhdari, "simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour air génération", mémoire de magister en université Sétif, Alger, 2014.
- [23] D.Bouamra, N. Beddi, "étude d'une machine asynchrone double étoile", Mémoire de master en Université d'El-Ouad, Alger, 2014.
-

Bibliographie

- [24] R. Casimir, “diagnostic des défauts des machines électriques par reconnaissances des formes “, Ecole centrale de Lyon, France, 2003.
-

Abstract

Abstract

The aim of this work is at first to possess a model of the double star asynchronous machine, which highlights the influence of the defects on the measurable quantities of the machine, mainly the currents in order to study the phenomena involved. The approach so-called Magnetically Coupled Electrical Circuits (CEMC) that have been used do not require complex calculation tools. The defects studied are the short-circuit between turns in the stator phases.

In order to made this study, we have established a state of the art on the construction of the double star asynchronous machine, with an emphasis on the possibility of occurrence of defects in both the stator and the rotor and the various tools used for detection and diagnosis, then the presentation of a real model of the asynchronous double star machine, and then a state representation is obtained whose resolution allows to find the evolution all the magnitudes of the machine, A program written under MATLAB allowed us to validate this model.

Résumé

L'objectif de ce travail est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone double étoile qui met en évidence l'influence des défauts sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants afin d'étudier les phénomènes mis en jeu, approche dite méthode des Circuits Electriques Magnétiquement couplés (CEMC) qu'on a utilisé ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes. Les défauts étudiés sont le court-circuit entre spires dans les phases statoriques.

Pour aborder cette étude, nous avons établi un état de l'art sur la constitution de la machine asynchrone double étoile en mettant l'accent sur les possibilités d'apparition des défauts tant au stator qu'au rotor, les divers outils utilisés pour la détection et le diagnostic, ensuite, la présentation d'un modèle réel de la machine asynchrone double étoile, et puis, une représentation d'état est obtenue dont la résolution permet de retrouver l'évolution toutes les grandeurs de la machine, en fin, Un programme écrit sous **MATLAB** nous a permis de valider ce modèle.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو في المقام الأول امتلاك نموذج من محرك غير متزامن ثنائي نجمي لتسليط الضوء على تأثير العيوب على مقاييس الجهاز، ولا سيما التيارات من أجل دراسة ظواهر معينة، ولذلك استعملنا نهج ما يسمى الدوائر الكهربائية المغناطيسية. الطريقة التي تم استخدامها لا تتطلب أدوات حسابية معقدة. العيوب المدروسة هي دائرة قصر بين المنعطفات في مراحل الجزء الثابت.

ولذلك لقد قمنا بصياغة وصف شامل لمكونات المحرك مع امكانيات حدوث الاعطاب في الجزء الثابت والمتحرك بالإضافة الى طرق تشخيص هذه الاعطاب. ولهذا قمنا بإنشاء نموذج حقيقي يمكننا من مراقبة التطورات في مقاييس الالة على شكل برنامج Matlab

Annexe

Données de l'alimentation

Tension d'alimentation maximale : $V_{\max} = 280$	V
Fréquence de l'alimentation (réseau) : $F_s = 50$	Hz
Nombre de paires de pôles : $p = 2$	
Pulsation de l'alimentation : $\omega_s = 2\pi f_s$;	rad/s
Couple résistant : $C_r = 0$	N.m

Paramètres de la machine

Moment d'inertie : $J_t = 0.0625$	kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux : $f_v = 0.005$	
Inductance propre au stator : $m_{ss} = 0.1034$	H
Inductance propre au rotor : $m_{rr} = 0.0582$	H
Inductance de fuite au stator : $L_{s1} = 0.006$	H
Inductance de fuite au rotor : $L_{r1} = 0.0008$	H
Inductance mutuelle entre le stator et le rotor : $m_{sr} = 0.0726$	H
Inductance cyclique au stator : $L_{sc} = (m_{ss} + L_{s1})$	H
Inductance cyclique au rotor : $L_{rc} = (m_{rr} + L_{r1})$	H
Résistance d'une phase du stator : $R_s = 1.86$	ω
Résistance d'une phase au rotor : $R_r = 2.12$	ω
L'angle électrique : $\alpha = \pi/6$	rad