

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Faculté de Technologie

Université Abderrahmane Mira - Bejaïa



Département de Génie Electrique

Filière: Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Mémoire de Fin de Cycle

En vue l'obtention du diplôme

"MASTER"

Thème

Etude et diagnostic d'un moteur asynchrone à rotor bobiné double étoile en régimes normal et dégradé

Présenté par :

Guettaf Gouraya et Nait Benali Louiza

Encadré par :

	Grade	Qualité
Mr AOUZELLAG D.	Pr	Promoteur
Mr IMAOUCHEN Y.	Dr	Promoteur

Année Universitaire : 2021/2022

« Le plus grand échec est de ne pas avoir le courage d'oser. »

Abbé Pierre

Remerciements

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant et le Miséricordieux qui nous a donné le courage, la foi, la volonté, la patience et la santé pour finaliser ce travail et nous avoir permis d'atteindre la fin de notre formation.

Nous tenons à exprimer nos profond remerciements à nos deux promoteurs Mr Yacine IMAOUCHEN et Mr Djamel AOUZELLAG pour leur encadrement durant tout le long de ce travail, leurs encouragements, leur soutien scientifique et moral et leur disponibilité ainsi que la confiance qu'ils nous ont témoigné en nous confiant ce travail attrayant.

Un grand merci à nos familles et tous nos amis, plus particulièrement à nos parents pour nous avoir soutenus et aidés tout au long de nos études.

Notre remerciement s'adresse également à tous nos enseignants du département de génie électrique pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leur charge académique et professionnelle.

Nous voudrions également remercier vivement les membres du jury qui nous ont honorés en acceptant d'examiner et d'enrichir ce travail.



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma

Considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A ma c hère grande mère, partie à l'éternité, mais elle reste gravé dans ma mémoire Que dieu l'accueil dans son vaste paradis

A mes chers frère et sœurs. Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur du monde

A mes amies et mes camarades qui sont toujours avec moi dans le bien et le mal Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur.

*A mon cher oncle qui est mon 2ème papa
Que dieu le protège inshallah*

A Toute personne

Que j'aime dans ce monde.

GOURAYA



DÉDICACE

Je dédicace ce travail aux personnes qui ont nourri mon cœur, mon âme et mon esprit, mes parents. L'amour, le respect que j'ai pour eux ne sauraient être exprimés, ma réussite est la vôtre et elle est le fruit de vos efforts. Mon père Amran qui est mon maître et un mentor pour moi, ma mère Nassira qui est ma boussole morale.

À ma petite sœur mon pilier, mon amie, mon havre de paix, avec qui main dans la main nous ferons face à toutes les difficultés.

Ma tante Soraya et mes chères cousines notamment Meriem, Noria, Khoukha et Farida qui sont comme des sœurs pour moi, mon oncle Kadar qui nous a quitté trop tôt, et ma tante Hmama qui est comme une second maman pour moi.

Ma plume ne saurait oublier toute ma famille, mes amis ainsi que chaque enseignant qui m'a guidé du premier jour jusqu'à aujourd'hui.

Je dédie ce travail à chaque homme et femme de sciences qui ont apporté une brique à l'édifice de la connaissance.

Merci à tous.

Louiza

Table des matières

Table des matières

➤ Introduction générale 1

Chapitre I: Etude d'un moteur asynchrone double étoile avec différents défauts

I.1	Introduction.....	3
I.2	Histoire des machines électriques	3
I.3	Caractéristiques des machines multiphasées.....	3
I.3.1	Machines multiphasées de type1	3
I.3.2	Machines multiphasées de type2.....	5
I.4	Définition de la machine asynchrone double étoile	6
I.5	Constitution de la machine asynchrone double étoile.....	6
I.6	Principe de fonctionnement.....	8
I.7	Avantages de la machine asynchrone double étoile	8
I.8	Inconvénients de la machine asynchrone double étoile	9
I.9	Défaillances de la machine asynchrone double étoile.....	9
I.10	Techniques de diagnostic des machines électriques	16

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone double étoile

II.1	Introduction.....	22
II.2	Description de la machine asynchrone double étoile.....	22
II.3	Hypothèses simplificatrices d'étude.....	23
II.4	Modèle de la MASDE dans le repère naturel (abc)	23

II.4.1 Equations des tensions	24
II.4.2 Equations des flux	25
II.4.3 Equations mécaniques	27
II.4.4 Equation du couple électromagnétique	27
II.5 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le repère naturel (abc)	27
II.6 Modèle de la MASDE selon le système d'axes (dqo)	31
II.6.1 Modèle de Park.....	31
II.6.2 Application de la transformation de Park à la MASDE.....	31
II.7 Simulation de la MASDE dans le repère (dqo) relié au champ tournant ...	33
II.8 Analyse spectrale dans le repère (abc).....	36
II.9 Conclusion.....	38

Chapitre III: Modèle de la MASDE en présence de défauts rotorique et statorique

III.1 Introduction	40
III.2 Paramètres du rotor de la machine étudiée	40
III.3 Modélisation de la MASDE en présence du défaut d'ouverture d'une phase statorique et rotorique	41
III.3.1 Equations électriques de la MASDE dans le cas des deux neutres flottants (statorique et rotorique) ...	41
III.3.2 Equations magnétiques	43
III.3.3 Equation de couple électromagnétique.....	45
III.3.4 Equation mécanique.....	45
III.3.5 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE avec défauts d'ouverture de phase dans le repère naturel (abc).....	45

III.3.6 Analyse spectrale des résultats obtenus en présence de défauts d'ouverture d'une phase statorique et rotorique.....	52
III.4 Modélisation de la MASDE en tenant compte d'un court-circuit entre spires dans une phase statorique de la première étoile.....	56
III.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	57
III.4.2 Equations électriques.....	58
III.4.3 Equations magnétiques.....	59
III.4.4 Equation mécanique.....	61
III.4.5 Equation du couple électromagnétique.....	61
III.4.6 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE en tenant compte d'un court-circuit entre spires dans la première phase statorique de l'étoile 1	61
III.4.7 Analyse spectrale des résultats obtenus en présence de défauts de court-circuit au stator...	70
III.5 Conclusion.....	75



***LISTE DES
FIGURES***

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Etude d'un moteur asynchrone double étoile avec différents défauts

FIGURES	NOMS	PAGES
Figure I.1	Eléments de constitution d'une machine asynchrone	6
Figure I.2	Vue schématique en perspective du stator	7
Figure I.3	Photo du rotor d'un moteur asynchrone	8
Figure I.4	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée	10
Figure I.5	Représentation d'un roulement à billes	11
Figure I.6	Différents types de défauts statoriques	13
Figure I.7	Détériorations typiques d'isolation menant à des courts-circuits dans les enroulements statoriques	14
Figure I.8	Court-circuit entre spires dans la même phase	14
Figure I.9	Court-circuit entre phases	15
Figure I.10	Différents types excentricités a/ statique, b/ dynamique, c/ mixte	16
Figure I.11	Diaporama des méthodes de diagnostics de machine électrique	12
Figure I.12	Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts	20

CHAPITRE II: Modélisation de la machine asynchrone double étoile

FIGURES	NOMS	PAGES
Figure II.1	Représentation schématique des enroulements de la MASDE	22
Figure II.2	Allure du couple électromagnétique à l'état sain dans le repère (abc)	28
Figure II.3	Allure de la vitesse de rotation à l'état sain dans le repère (abc)	29
Figure II.4	Allure des courants statoriques de la première étoile à l'état sain dans le repère (abc)	29
Figure II.5	Allure des courants statoriques de la deuxième étoile à l'état sain dans le repère (abc)	30
Figure II.6	Allure des courants rotoriques à l'état sain dans le repère (abc)	30
Figure II.7	Transformation de Park	32

Figure II.8	Allure du couple électromagnétique à l'état sain dans le repère (dqo)	34
Figure II.9	Allure de la vitesse de rotation à l'état sain dans le repère (abc)	34
Figure II.10	Allure des courants rotoriques à l'état sain dans le repère (abc)	35
Figure II.11	Allure des courants statoriques de la première étoile à l'état sain dans le repère (abc)	35
Figure II.12	Allure des courants statoriques de la deuxième étoile à l'état sain dans le repère (abc)	36
Figure II.13	Spectre du courant d'une phase statorique de la MASDE à l'état sain	37
Figure II.14	Spectre du couple électromagnétique à l'état sain	37
Figure II.15	Spectre de la vitesse	38

CHAPITRE III: Modèle de la MASDE en présence de défauts statorique et rotorique.

FIGURES	NOMS	PAGES
Figure III.1	Photo d'un rotor bobiné	40
Figure III.2	Schéma de connexions des différentes phases statoriques et rotoriques	41
Figure III.3	Allure des courants statoriques 1 avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié	46
Figure III.4	Allure des courants statoriques 2 avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié	46
Figure III.5	Allure des courants rotoriques avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié	47
Figure III.6	Allure de la vitesse avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié	48
Figure III.7	Allure du couple électromagnétique avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié	48
Figure III.8	Allure des courants statoriques 1 avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié	49
Figure III.9	Allure des courants statoriques 2 avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié	50
Figure III.10	Allure des courants rotoriques avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié	51
Figure III.11	Allure du couple électromagnétique avec défaut d'ouverture de la	51

	première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié	
Figure III.12	Allure de la vitesse avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié	52
Figure III.13	Spectre du courant statorique (étoile1) dans le cas d'ouverture d'une phase statorique	53
Figure III.14	Spectre du couple électromagnétique dans le cas d'ouverture d'une phase statorique	53
Figure III.15	Spectre de la vitesse dans le cas d'ouverture d'une phase statorique	54
Figure III.16	Spectre du courant statorique (étoile1) dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique	55
Figure III.17	Spectre du couple électromagnétique dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique	55
Figure III.18	Spectre de la vitesse dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique	56
Figure III.19	Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la phase	57
Figure III.20	Allures des courants statoriques 1 en présence de court-circuit en phase A de (a) 5%, (b) 15%, et (c) 25%	63
Figure III.21	Allures des courants statoriques 2 en présence de court-circuit en phase A de (a) 5%, (b) 15%, et (c) 25%	65
Figure III.22	Allures des courants rotoriques en présence de court-circuit en phase A de (a) 5%, (b) 15%, et (c) 25%	66
Figure III.23	Allures des vitesses en présence de court-circuit en phase A de (a) 5%, (b) 15%, et (c) 25%	68
Figure III.24	Allures des couples électromagnétiques en présence de court-circuit en phase A de (a) 5%, (b) 15%, et (c) 25%	70
Figure III.25	Spectres du courant statorique lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique	72
Figure III.26	Spectres du couple électromagnétique lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique	73
Figure III.27	Spectres de la vitesse lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique	83

Liste des
Symboles et abréviation

Liste des symboles et abréviation

MASDE	Machine asynchrone double étoile
$C_{em} ; C_r$	Couples électromagnétique et résistant en (N.m)
f	Fréquence d'alimentation en (Hz)
g	Glissement
$[G_{abc}]$	Vecteur assemblé des grandeurs du système triphasé équilibré
$[G_{dq0}]$	Vecteur assemblé des grandeurs du système biphasé équilibré
$[i_{s1}]; [i_{s2}]; [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques 1 et 2 et rotorique, respectivement en (A)
$i_{sd}; i_{sq}$	Courants direct et en quadrature statoriques en (A)
$i_{rd}; i_{rq}$	Courants direct et en quadrature rotoriques en (A)
J	Moment d'inertie en (kg.m ²)
K_f	Coefficient de frottement en (N.m.s/rd)
L_{s1}	Inductance de fuite de la 1 ère étoile en (H)
L_{s2}	Inductance de fuite de la deuxième étoile en (H)
L_r	Inductance de fuite d'une phase du rotor en (H)
L_{ms}	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique en (H)
L_{mr}	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique en (H)
$L_{s1} + L_m$	Inductance propre cyclique de l'étoile 1 en (H)
$L_{s2} + L_m$	Inductance propre cyclique que de l'étoile 2 en (H)
$L_r + L_m$	Inductance propre cyclique du rotor en (H)
$M_{s1r} ; M_{rs1}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre la première étoile et le rotor et entre le rotor et la première étoile, respectivement en (H)
$M_{s2r} ; M_{rs2}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre la deuxième étoile et le rotor et entre le rotor et la deuxième étoile, respectivement en (H)
P	Nombre de pair de pôle
r_{s1}	Résistance d'une phase de la 1ère étoile en (Ω)
r_{s2}	Résistance d'une phase de la 2ème étoile en (Ω)
r_r	Résistance d'une phase du rotor en (Ω)
$[r_{s1}]; [r_{s1}]; [r_r]$	Matrices des résistances statoriques 1 et 2 et rotoriques en (Ω)
$[v_{s1}]; [v_{s2}]; [v_r]$: Vecteurs des tensions statoriques 1 et 2 et rotoriques, respectivement en (V)
$[\Phi_{s1}]; [\Phi_{s2}]; [\Phi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotorique en (Wb)
μ	Nombre de spire en court-circuit par rapport aux nombre de spires de la phase(a)

θ_{coor}	Angle constitué par les axes A en (rd)
Ω_r	Vitesse de rotation mécanique en (rd/s)
r_{ns1} et i_{hs1}	Résistance et courant homopolaire entre deux neutres au stator1
r_{ns2} et i_{hs2}	Résistance et courant homopolaire entre deux neutres au stator2
r_{nr} et i_{hr}	Résistance et courant homopolaire entre deux neutres au rotor
f_{ext}	Fréquence caractéristique d'un défaut de court-circuit
f_s	Fréquence du champ tournant
α	Décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.
$q\alpha$	nombre équivalent de phases

Introduction

Générale

Introduction générale

Il y a longtemps, le monde industriel était dominé par les moteurs à courant continu en raison de leur facilité de contrôle. À l'heure actuelle, les moteurs à courant alternatif occupent une place importante dans la production d'énergie électrique et les actionneurs électromécaniques. Cela est dû au développement rapide de la technologie de l'électronique de puissance et au développement de la commande numérique ces dernières années. Les premiers moteurs à courant alternatif étaient biphasés. Cependant, la version triphasée fut bientôt imposée par l'Allemand Michael Dolivo-Dobrovolski, qui réalisa le premier moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil en 1889, qui domina largement le domaine des moteurs électriques grâce au fait qu'il présentait plusieurs avantages, entre autre elle est la plus facile à fabriquer, a le coût le plus bas, les exigences de maintenance les plus faibles, un taux d'échec extrêmement faible et une qualité de construction élevée et une très grande échelle de puissance. Il conserva ses composants de base avec peu de modifications et a également ajouté l'avantage de la standardisation [1].

Ce travail se focalisera sur l'étude d'une machine asynchrone double étoile à rotor bobiné, nous nous intéresserons seulement aux défauts de court-circuit (statorique) et l'ouverture d'une phase (statorique ou rotorique).

Ce mémoire comporte trois chapitres, dans le premier chapitre on présentera d'une façon générale la machine asynchrone double étoile (sa description, ces constitutions, son principe de fonctionnement, ces avantages, ces inconvénients) puis on citera les différents défauts qui y apparaisse ensuite on présentera les méthodes utilisées pour diagnostiquer ces défaillances.

Dans le deuxième chapitre, nous poserons les fondations du projet en réalisant la simulation de la MASDE sur MATLAB/Simulink à l'aide de ses différentes équations mathématiques et ce dans son état sain, nous effectuerons aussi une analyse spectrale pour observer son spectre en régime établi.

Enfin dans le troisième et dernier chapitre, nous introduirons les défauts que nous avons choisis d'aborder. Dans le modèle de la MASDE, on applique les défauts de l'ouverture des phases (statoriques et rotoriques) puis on simulera le modèle sous l'environnement MATLAB afin d'analyser les différentes grandeurs temporelles telles que les courants statoriques et rotoriques la vitesse de rotation le couple électromagnétique, puis on analysera les grandeurs obtenues par ces simulations dans le domaine fréquentiel par une analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier, enfin on terminera avec une conclusion générale pour délivrer une synthèse sur les différents points discutés dans ce mémoire.

Chapitre I

*Etude d'un moteur
asynchrone double
étoile avec différents
défauts*

I.1) Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons d'une part la machine asynchrone double étoile et ses composants, son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients, mais aussi les types de défauts qui peuvent y survenir, enfin nous rappelons les techniques de diagnostics des défauts de la MAS, notamment l'analyse spectrale des signaux qui seront exploités dans les chapitres qui suivent.

I.2) Histoire des machines électriques

Avant de rentrer dans les détails techniques de la machine asynchrone nous revisitons l'histoire des machines électriques et leur évolution à travers les décennies [1].

En 1821, l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique. L'année suivante, Peter Barlow lui adjoint une roue dentée s'appelant «roue de BARLOW ». En 1831, Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. Dans la même période, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène. En 1832, Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Paxi ont réalisé la génératrice à courant continu. En 1836, l'Anglais Hyde Clarke réalisait une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Paxi/Ampère qui améliorait le commutateur redresseur. En 1842, Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable. En 1848, apparaissaient les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500 N.m. Ces moteurs furent probablement les premiers à être utilisés pour les applications industrielles. En 1860, la compagnie "l'Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes. En 1865, l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré. En 1888, Nikola Tesla déposa une quantité de brevets pour tout son système polyphasé (transformateurs, générateurs moteur synchrones et asynchrones, etc.), en particulier pour un moteur asynchrone à induit en anneau.

I.3) Caractéristiques des machines multiphasées

Le concept de la machine multiphasée ne diffère de celui de la machine triphasée que par le nombre de phases et le décalage entre deux phases consécutives. On distingue habituellement deux types de machines multiphasées, suivant le nombre de phases statoriques (multiple de trois ou non). On peut ainsi les classer en deux groupes que l'on nommera « machine multiphasée de type 1 » et « machine multiphasée de type 2 » [2].

I.3.1) Machine multiphasées de type 1

Les machines multiphasées de type 1 appelées aussi « machine multi-étoile» sont des machines dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois de la façon qu'on peut les regrouper en n étoiles triphasées :

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

Ce type de machine possède plusieurs configurations possibles selon le nombre donné de phases, 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 $\alpha = \frac{\pi}{3}$

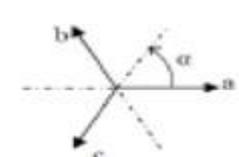
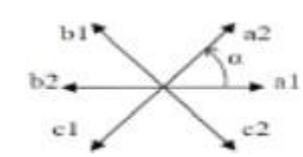
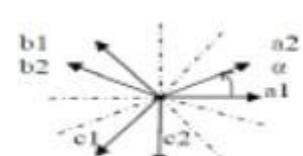
Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté q_α , dont la définition est comme suit :

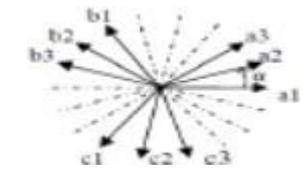
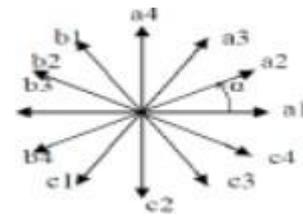
$$q_\alpha = \frac{q}{\alpha} \tag{I.1}$$

Où α : Décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

Le tableau I.1 donne des détails sur quelques exemples des machines multiphasées de type 1[3].

Tableau I.1 : Exemples des machines multiphasées de type 1

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent De phases (q_α)	Décalage angulaire (α)	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	$\frac{\pi}{6}$	

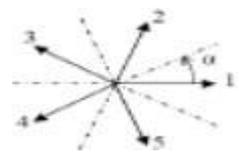
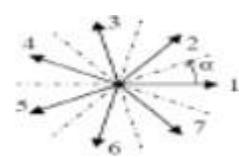
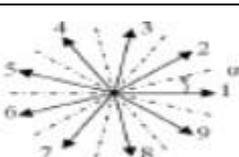
I.3.2 Machines multiphasées de type 2

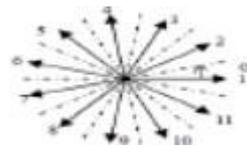
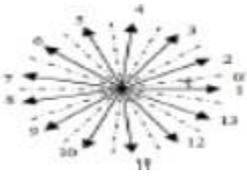
Les machines multiphasées de type 2 sont les machines dont le nombre de phases statoriques est impair et différent de trois. Dans ce type, les phases sont régulièrement décalées de $2\pi/q = 2\alpha$. On a donc toujours :

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \tag{I.2}$$

Le tableau I.2 donne des détails sur quelques exemples des machines multiphasées de type 2.

Tableau I.2 : Exemples des machines multiphasées de type 2

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation des axes des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	

11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

I.4) Définition des moteurs asynchrones à double étoile

La machine asynchrone à double étoile est une machine qui possède deux enroulements triphasés identiques ayant le même nombre de pôles et alimentés à la même fréquence. Les deux étoiles contiennent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de 30°.

La structure de rotor est la même qu'une machine triphasée ; il peut être soit à rotor bobiné soit à cage d'écuréuil [4].

I.5) Constitution du moteur asynchrone à double étoile

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

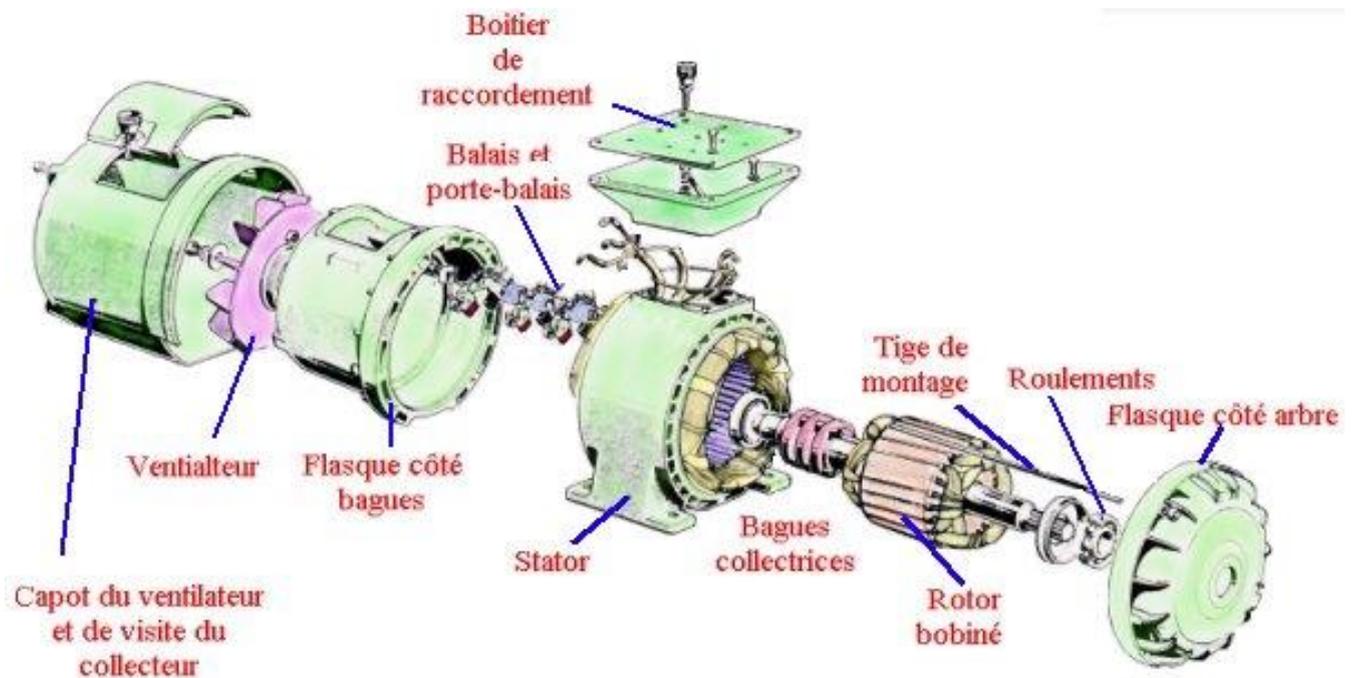


Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone

Le moteur se compose d'une partie fixe dite stator et une partie mobile dite rotor.

a) Stator

Partie fixe (stator ou inducteur), il comporte deux enroulements triphasés décalés entre eux d'un angle $\alpha = 30^\circ$, chacun est composé de trois phases identiques. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal $\frac{2\pi}{3}$ dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique. Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé de courant équilibré, d'où la création d'un champ tournant glissant dans l'entrefer. La vitesse de rotation du champ tournant est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques tel que :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad (I.3)$$



Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator

b) Rotor

C'est la partie mobile du moteur, il existe trois types de rotors, le rotor bobiné qui supporte trois bobinages similaires à celui du stator, ces derniers sont couplés généralement en étoile et les autres extrémités sont connectées à trois bagues en cuivre. Et le rotor à cage d'écureuil est le type de rotor le plus utilisé dans l'industrie. Cet enroulement est constitué de barres de cuivre pour des gros moteurs et d'aluminium pour les petits ; ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit « de court-circuit » eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium [5]. Le dernier type de rotor est à rotor massif. La figure I.3 montre les différents de ces rotors.



Figure I.3 : Différents rotors des MAS

c) Parties mécaniques

a) **Carcasse** : Elle joue le rôle d'enveloppe, elle sert de support à l'ensemble des pièces de la machine, elle renferme le stator et elle est caractérisée par la hauteur de l'axe.

b) **Arbre et rotor** : Organe de transmission, il sert à transmettre le couple.

c) **Paliers** : Permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre du rotor, sont constitués de deux flasques et de deux roulements à billes insérées à chaud sur l'arbre mécanique. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

d) **Flasques** : Servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes de la machine.

e) **Ventilation** : Facilite le refroidissement de la machine.

I.6) Principe de fonctionnement d'un MASDE

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur l'application des trois principes de l'électromagnétisme (loi d'Ampère, loi de Laplace et la loi de Faraday).

Grâce à l'interaction électromagnétique, des champs tournants créent par les deux systèmes de tensions fournies 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 induit [6].

I.7) Avantages des machines asynchrones à double étoile

La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Segmentation de la puissance : L'augmentation du nombre de phases provoque la segmentation de la puissance, par conséquent la puissance totale sera divisée par un nombre important de phases, alors la puissance totale demandée par chaque phase sera réduite, ce qui diminue le courant par phase [2] ;
- Elimination d'harmonique d'espace : L'avantage c'est que plus on augmente le nombre de phases, plus le nombre d'encoches par pôle et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental ;
- Employer la MASDE permettrait de réduire le couple pulsatoire et d'augmenter l'efficacité de la machine [7];
- Bas courant par phase sans y réduire la tension (par phase) [8];
- Les machines asynchrones double étoile font moins de bruit par rapport aux triphasées [7].

I.8) Inconvénients des MASDE

- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux présente un inconvénient, ce qui complique sa commande ;
- Le coût : le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseurs/machine [9].

I.9) Défaillance de la machine asynchrone

L'origine des défaillances peuvent être diverses, on les classe en trois types majeurs :

- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : défauts électriques, surchauffe du moteur, problèmes mécaniques, rupture de fixations, problèmes d'isolation, survoltage d'alimentation, etc. Ces causes sont à l'origine de la naissance des défauts dans la machine;
- **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la fréquence ou de la tension), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc. Ces causes favorisent le développement des défauts dans la machine;
- **Les erreurs humaines** : défauts de fabrication, utilisation des composants défectueux, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Les défauts dans la machines asynchrones peuvent être aussi classés en deux catégories, défauts interne ou externe. La défaillance interne arrive quand un composant à l'intérieur de la machine est défectueux (circuit magnétique, rotorique et statorique, bobinage statorique, entrefer, cage d'écureuil rotorique, etc.), les défauts externes eux sont causés par des circonstances qui dépendent de l'environnement comme l'alimentation ou la charge. La figure I.4 illustre les causes internes de défauts d'une machine asynchrone.

I.9.1 Défaillance mécanique

Les défauts mécaniques sont généralement les plus fréquents dans la machine asynchrone, ils occurrent souvent au niveau des composants les plus sollicités par les efforts mécaniques ou magnétiques (roulement, l'arbre, flasques)

a) Défauts dans les roulements

Les roulements sont responsables de la transmission du mouvement et de la force, ils sont donc un composant très important dans les machines électriques tournantes, leur défaillance et aussi plus récurrente, ils sont causés par de multiples facteurs dont par exemple:

- Problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, résultat d'un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, tôt ou tard des fragments finissent par entraver le mouvement des roulements et donc provoquent des perturbations ;
- La lubrification est une autre cause de problèmes pour les roulements, elle assure leur bonne rotation mais un mauvais choix du produit ou sa dégradation au fil du temps génère une résistance au mouvement de rotation.

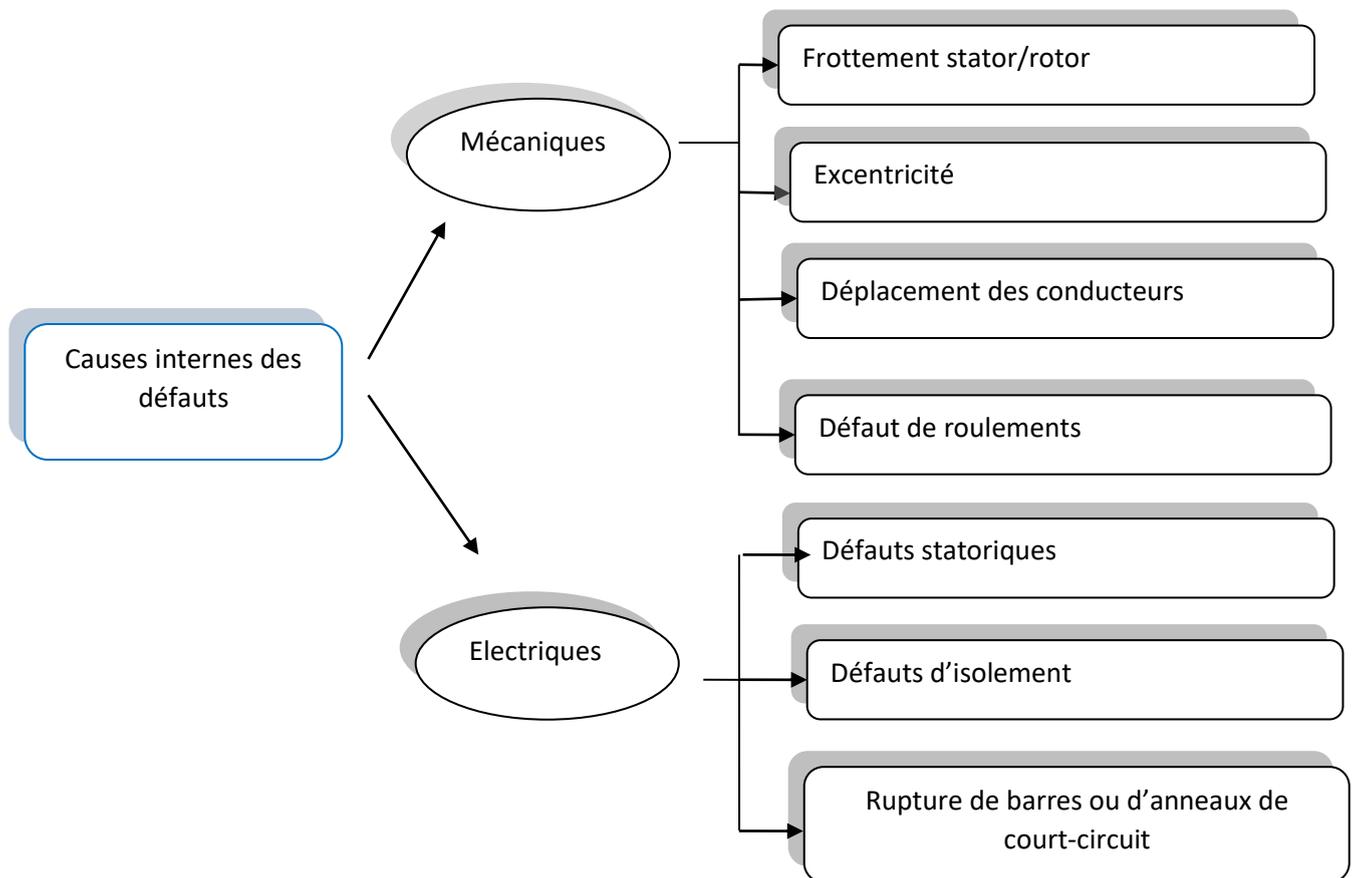


Figure I.4 : Causes interne de défauts de la machine asynchrone

Ce genre de défauts se manifeste par l'apparition de vibrations, oscillations du couple de charge, un jeu entre les bagues interne et externe du roulement, un roulement défectueux peut entraîner le blocage du moteur dans le meilleur des cas ou sa panne dans le pire [28].



Figure I.5 Représentation d'un roulement à billes

a) Défauts dans les flasques

Le défaut de flasque est un défaut causé par des erreurs de fabrication, le mauvais positionnement des flasques provoque le désalignement des roulements à billes, et donc fatalement, l'excentricité de l'arbre engendrant des vibrations et la variation de l'entrefer qui par la suite modifie le comportement électromagnétique de la machine.

b) Défauts de l'arbre

Des fissures peuvent survenir à cause de l'utilisation d'un mauvais matériau durant la construction, ces fissures s'aggravent avec le temps et ultimement peuvent provoquer une fracture de l'arbre. L'arbre étant une pièce importante de la machine sa fracture engendre un arrêt irrémédiable.

L'humidité peut être à l'origine de microfissure dont résulte à long terme la destruction complète de la machine [27].

Une excentricité statique, dynamique ou mixte provoque des efforts importants, qui induisent une fatigue supplémentaire.

c) Déséquilibre : défauts de balourd

En principe chaque machine a un effet balourd qui résulte d'un déséquilibre résiduel, car, en pratique, il est impossible d'obtenir une concentricité parfaite des centres de gravité de chaque élément constitutif d'un rotor, lors de l'usinage, assemblage ou encore le montage, la non-concentricité des éléments engendre des forces centrifuges qui déforment le rotor. Les conséquences qui peuvent être observés sont :

- Une altération mécanique (perte d'ailette, érosion ou encrassement) ;
- Une altération thermique (déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées) ;

d) Défauts de transmission par courroies

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est lié à une détérioration localisée d'une courroie

(partie arrachée, défaut de jointure), impliquant un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage de ce défaut et il existe deux autres types de défauts pour ce mode de transmission :

- Lorsqu'une ou plusieurs courroies sont insuffisamment tendues, il peut se produire un phénomène visible sur le spectre, créé par des fréquences de passage des courroies différentes et très proches les unes des autres ; ces différences sont produites par un glissement plus ou moins important selon la tension exercée sur les courroies ;
- Lorsque les courroies de transmission ont subi une usure importante et qu'elles ont tendance à venir se coincer au fond de la gorge, il apparaît une vibration d'amplitude importante aux hautes fréquences.

I.9.3 Défauts d'ordre électrique

Les défauts de nature électrique peuvent être à l'origine d'arrêt de la machine, nous distinguons deux principales catégories : Les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques

1) Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- Thermique (surcharge)
- Électrique (diélectrique)
- Mécanique (bobinage)
- Environnement (agression)

Les défauts les plus récurrents, au niveau du stator peuvent être mentionnés comme suit [24]:

- Court-circuit entre spires de la même bobine ;
- Court-circuit entre bobines de la même phase;
- Court-circuit entre phases;
- Ouverture d'une phase ;
- Défaut à la terre.

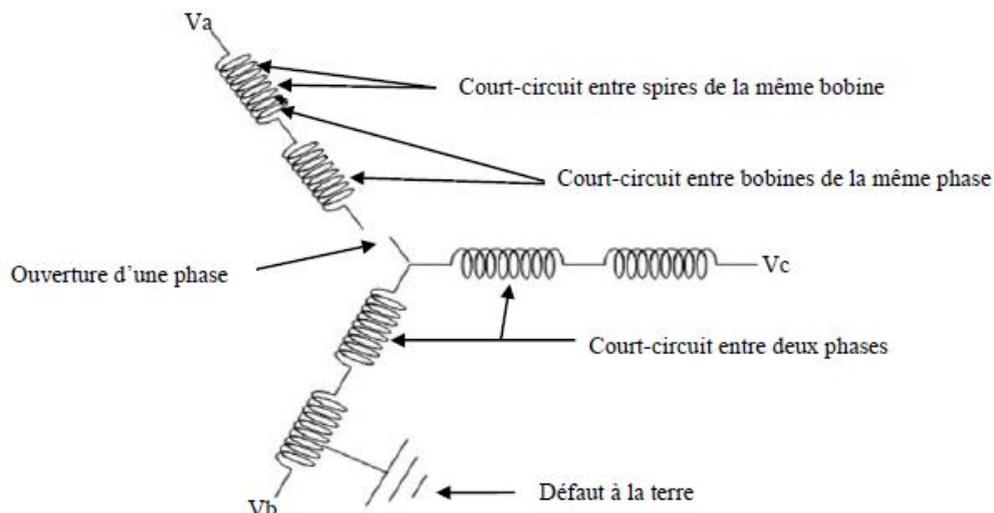


Figure I.6: Différents types de défauts statoriques

a) Défauts d'isolant dans les enroulements

Les différentes pertes (à effet Joule, fer, mécanique) provoquent des phénomènes thermiques qui endommagent l'isolant car les matériaux d'isolation ont une limite de température et de tension, cette dégradation peut être à l'origine d'un court-circuit.

Par conséquent, l'environnement de travail du matériau est essentiel. Si les limites de l'isolant sont dépassées, celui-ci se dégrade rapidement et ultimement n'arrive plus à assurer sa fonction. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication ;
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation;
- Vibration mécanique;
- Courant élevé dans l'enroulement dû au court-circuit : une surcharge entraîne une élévation de la température qui dégrade le matériau d'isolation;
- Vieillessement naturel des isolants [29].



Figure I.7 : Détérioration typiques d'isolation menant à des courts-circuits dans les enroulements statoriques

b) Court-circuit entre spires

Un court-circuit arrive lorsqu'un défaut d'isolement entre deux spires de même phase est défectueux, c'est un défaut assez fréquent. Il peut avoir comme origine un ou plusieurs points d'isolement.

De cette défaillance résulte plusieurs changements, notamment l'augmentation des courants statoriques dans la phase touchée par le défaut, une variation minimale de l'amplitude des deux autres phases, une influence sur le facteur de puissance et une amplification des courants dans le rotor est aussi à noter

entraînant une augmentation de la température dans le bobinage, ce qui conduit à une dégradation accélérée [21] [25].

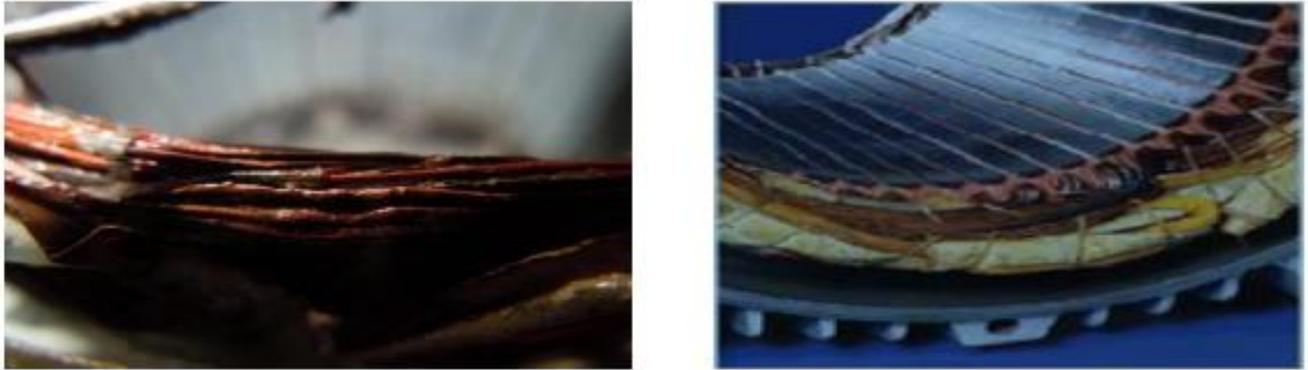


Figure I.9 : Court-circuit entre spires dans la même phase

c) *Court-circuit entre phases*

Un autre type de court-circuit est celui qui arrive entre deux phases différentes. Il peut survenir en tout point. Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, des courants très élevés en résultent et la fusion des conducteurs est à prévoir [22].



Figure I.9 : Court-circuit entre phases

d) *Défauts de circuit magnétique*

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension [20].

2) *Défaillances au rotor*

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème [20] -[22]:

- thermique (surcharge) ;
- électromagnétique;

- résiduel (déformation) ;
- dynamique (arbre de transmission) ;
- environnemental (agression).

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

a) Rupture de beaucoup de barres dans les machines

L'un des défauts qui survient le plus souvent dans le rotor est les cassures de barres, ce défaut se produit soit au niveau de son encoche soit aux extrémités des barres qui les relient à l'anneau rotorique.

Une détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, elles engendrent des oscillations de la vitesse rotorique et donc provoquent des vibrations mécaniques ce qui est un fonctionnement anormal de la machine, comme l'amplitude de ces oscillations provoque la détérioration de la machine, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées. On l'appelle l'effet d'une cassure de barre et il augmente proportionnellement au nombre de barres cassées [23] [24].

b) Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

La rupture d'une portion d'anneau est due soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et anneaux, ce défaut est aussi fréquent que la cassure de barre(s). Il est difficile de le détecter car en général il est confondu ou bien regroupé avec la rupture de barre(s) dans les études statistiques.

Les courants que véhiculent les anneaux de court-circuit sont plus importants que ceux des barres rotoriques, par conséquent le moindre défaut peut entraîner leur cassure (un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, etc.) ou une surcharge de couple et donc de courants, lorsqu'un anneau se rompt, un effet de modulation d'amplitude est engendré par le déséquilibre de la répartition des courants [25][26].

c) Excentricités statique et dynamique

Le phénomène d'excentricité (statique et dynamique) est défini comme un décentrement du rotor dont l'origine est liée au positionnement incorrect des paliers durant l'assemblage, trois cas d'excentricité sont généralement distingués [20] [25]:

- l'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage statorique mais tourne toujours autour de son axe ;
- l'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe ;
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associe les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statoriques ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [20][21].

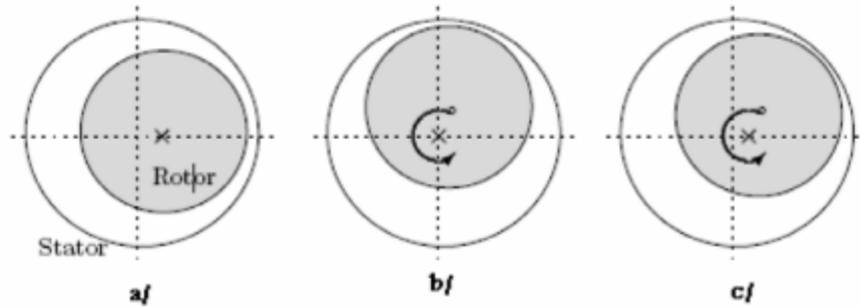


Figure I.10: Différents types d'excentricités : **a/** statique, **b/** dynamique, **c/** mixte

I.10 Techniques de diagnostic des machines électriques

La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et économique motivé par les objectifs de sûreté du fonctionnement et de continuité du service des entraînements électriques.

Le domaine du diagnostic est constitué essentiellement de trois axes qui conduisent à définir les trois méthodologies suivantes :

- ❖ Méthodes de connaissances ;
- ❖ Méthodes de redondances ;
- ❖ Méthode par modélisation des signaux (comme montre la figure I.11)[10].

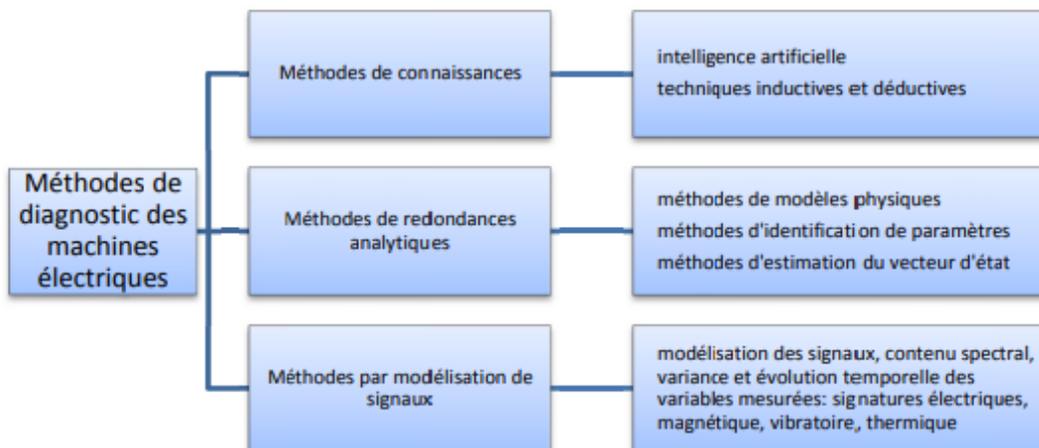


Figure I.11 : Diaporama des méthodes du diagnostic des machines électriques

I.10.1 Méthode par modélisation des signaux

Les méthodes par modélisation des signaux sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurés. Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électriques, magnétiques, vibratoires, thermiques [11].

On peut citer les techniques suivantes :

1) *Analyse fréquentielle (Filtrage)*

Une première approche du traitement du signal repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est bien évidemment très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont ici tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de panne (le problème, c'est qu'un changement de consigne modifie les caractéristiques fréquentielles et cela n'a rien d'un défaut) [14].

2) *Diagnostic par l'analyse vibratoire*

L'analyse vibratoire est la technique la plus fréquemment utilisée pour détecter les pannes de moteurs et diagnostiquer les défauts. Elle peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales ; ces vibrations fournissant des informations pratiquement sur tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés [15].

3) *Diagnostic par mesure du couple électromagnétique*

Cette méthode de mesure aide à visualiser tout défaut qui se trouve soit au niveau du rotor ou au niveau du stator car le couple électromagnétique provient de l'interaction entre le champ statorique et rotorique, (donc tout défaut qui se trouve dans ces derniers affectera le couple directement) [16].

4) *Diagnostic par mesure du courant statorique*

Cette méthode de mesure aide à extraire de manière précise les informations relatives aux défauts ; les recherches se sont particulièrement intéressées au spectre des courants statoriques car ils sont faciles à mesurer et ils fournissent des informations sur de nombreux défauts ; mais la mesure des signaux et leur traitement ne peuvent servir en terme d'identification que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues [19], les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ❖ L'apparition des raies spectrales dont la fréquence de synchronisme et la même que celle des champs tournants.
- ❖ L'apparition de changement dans l'amplitude de ces raies correspond à des fréquences exprimées sous la formule suivante :

$$f_{ext} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \mp k \right\} ; \text{avec } n = 1, 2, 3, \dots \text{ et } k = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{I.4})$$

Avec : f_{ext} ; Fréquence caractéristique d'un défaut de court-circuit ; f_s : Fréquence du champ tournant; g : glissement ; P : nombre de paires de pôles.

Détection des barres cassées par la mesure des courants statoriques : En effet, il est bien connu qu'un traitement de ses signaux fait apparaître des raies de leurs spectres à la fréquence de :

$$f_b = f_s(1 \mp 2g) \quad (I.5)$$

On utilisera cette méthode dans les chapitres suivants pour détecter des défaillances dans le moteur asynchrone dans les deux régimes sain et dégradé ; puisque l'accès y est très facile, ils nous permettent de détecter tout défaut électrique ou mécanique. Nous nous sommes intéressés spécifiquement au défaut des courants statoriques (court-circuit entre spires), la surveillance par analyse spectrale du moteur.

5) Analyse par tension de neutre

Afin de détecter le court-circuit entre spire dans les bobinages statorique et rotorique, ils ont utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone, c'est l'information la plus fiable pour permettre un diagnostic fiable dans les machines électriques [17][18].

I.10.2 Méthode de connaissance

Cette méthode se base sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expériences. Les techniques fréquemment utilisées dans cette méthode sont :

1) Réseaux de neurones artificiels

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation du modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Pour cela, des réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés. Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traitent d'une façon dynamique l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs [12].

2) Technique inductive et déductive

Cette méthode est utilisée essentiellement pour indiquer la cause des défauts en utilisant des modèles de panne.

I.10.3 Méthode analytique

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système. Elles exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller.

1) Observateurs

Les méthodes de l'observateur ont le rôle de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties.

La théorie des observateurs est utilisée pour les systèmes linéaires ou non linéaires, d'ordre plein (si le système nécessite une observation complète) ou d'ordre réduit dans le cas contraire (observateur généralisé) ou (observateur de Luenberger)[13].

2) Estimation paramétrique

L'approche d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non plus, comme précédemment, sur les variables du système physique. Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus [17].

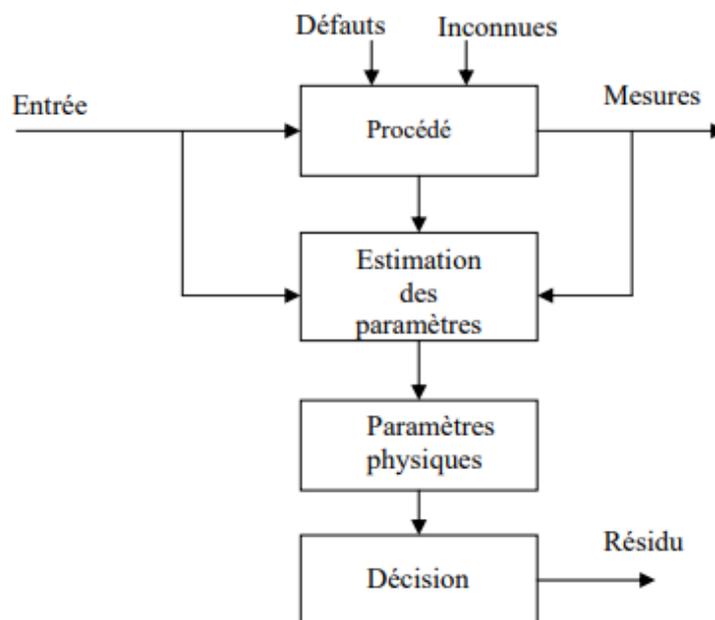


Figure I.13: Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts

I.11) Conclusion

Ce chapitre introduit notre mémoire par la description de la machine asynchrone à rotor bobiné ; nous avons expliqué son principe de fonctionnement, nous avons aussi défini les différentes parties qui la

Chapitre I : Étude d'un moteur asynchrone double étoile avec différents défauts

composent, ensuite nous avons énuméré les défauts que la MAS/MASDE pouvait avoir et nous les avons ordonnés selon plusieurs catégories pour une meilleure compréhension ; la catégorie la plus importante qui nous intéresse est celle des défauts électriques.

Enfin nous avons décrit les méthodes de diagnostic les plus utilisées.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et simulation de la MASDE ainsi que l'analyse spectrale au régime sain.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone double étoile

II.1 Introduction

La modélisation de la machine électrique asynchrone double étoile fait appel à des équations en général très complexes. En effet, la répartition des enroulements et la géométrie propre de la MASDE rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la MASDE. Dans le premier lieu, on a introduit le modèle mathématique de la machine asynchrone double étoile (équations électriques, magnétiques, mécaniques) dans le repère naturel (abc) puis on a réduit l'ordre du système avec la transformation dite de Park. Elle modélise la MASDE dans un nouveau repère (dqo). En dernier lieu, on a présenté la simulation des différentes caractéristiques de la MASDE à l'aide du logiciel MATLAB /Simulink et on a interprété ces résultats puis on a fait une analyse spectrale des signaux de cette machine à l'état sain.

II.2 Description de la machine asynchrone double étoile

La MASDE se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique ($\alpha = 30^\circ$), et d'un rotor bobiné. La figure (II.1) représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles (θ_{r1}) et ($\theta_{r2} - \alpha$) représentent respectivement la position du rotor (phase A_r) par rapport à l'étoile 1 (phase A_{s1}) et à l'étoile 2 (phase A_{s2}). Les grandeurs relatives aux deux étoiles (1 et 2) seront notées respectivement par les indices 1 et 2[2].

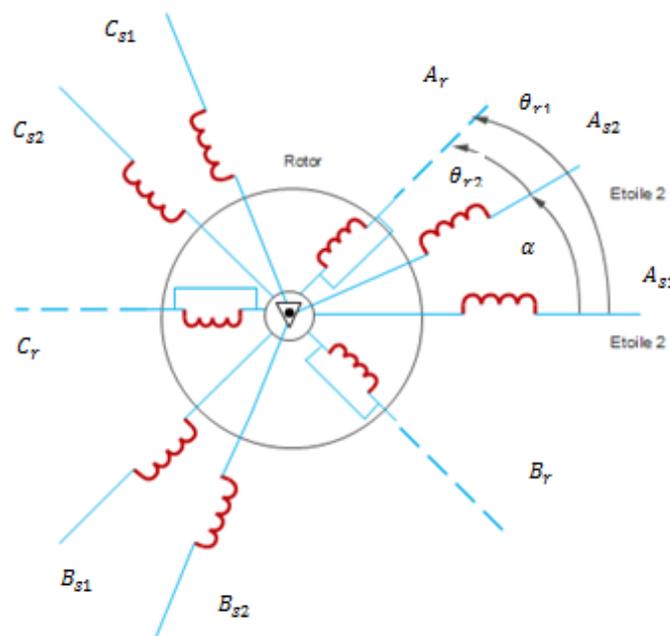


Figure II.1 - Représentation schématique des enroulements de la MASDE

II.3 Hypothèses simplificatrices d'étude

La machine asynchrone double étoile (MASDE), avec la répartition de ces enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [2].

- La machine est de constitution symétrique et à entrefer constant ;
- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligeables. Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités de courants ;
- Nous admettons de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

II.4 Modèle Naturel de la machine asynchrone à double étoile dans le repère (abc)

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, et la notation des vecteurs des grandeurs tension, courant et flux, on écrit pour :

Les vecteurs des tensions, courants et flux statoriques sont :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } \begin{cases} v_{s1} = [v_{as1} & v_{bs1} & v_{cs1}]^T \\ i_{s1} = [i_{as1} & i_{bs1} & i_{cs1}]^T \\ \phi_{s1} = [\phi_{as1} & \phi_{bs1} & \phi_{cs1}]^T \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } \begin{cases} v_{s2} = [v_{as2} & v_{bs2} & v_{cs2}]^T \\ i_{s2} = [i_{as2} & i_{bs2} & i_{cs2}]^T \\ \phi_{s2} = [\phi_{as2} & \phi_{bs2} & \phi_{cs2}]^T \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Les vecteurs de tensions, courants et flux rotoriques sont :

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} V_r = [v_{ar} & v_{br} & v_{cr}]^T \\ i_r = [i_{ar} & i_{br} & i_{cr}]^T \\ \phi_r = [\phi_{ar} & \phi_{br} & \phi_{cr}]^T \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.4.1 Équations des tensions

Les équations de tension dans le repère (abc) sont écrites sous forme suivante :

Stator 1:

$$\begin{cases} v_{as1} = r_{as1}i_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = r_{bs1}i_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = r_{cs1}i_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4.a})$$

On peut introduire cette équation sous cette forme :

$$[v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d[\phi_{s1}]}{dt} \quad (\text{II.4.b})$$

$$\text{Stator 2 : } \begin{cases} v_{as2} = r_{as2}i_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = r_{bs2}i_{bs2} + \frac{d\phi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = r_{cs2}i_{cs2} + \frac{d\phi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5.a})$$

On peut introduire cette équation sous cette forme :

$$[v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d[\phi_{s2}]}{dt} \quad (\text{II.5.b})$$

$$\text{Rotor: } \begin{cases} v_{ar} = r_{ar}i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = r_{br}i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = r_{cr}i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.6.a})$$

On peut introduire cette équation sous cette forme :

$$[v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (\text{II.6.b})$$

Les matrices des résistances statoriques et rotoriques respectivement, sont comme suite :

$$\begin{cases} [r_{s1}] = r_{s1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ [r_{s2}] = r_{s2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ [r_r] = r_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec : r_{s1} , r_{s2} et r_r : Résistances d'une phase de la premier étoile, de la deuxième étoile et du rotor, respectivement.

II.4.2 Équations des flux

Les expressions des flux statoriques et rotoriques en fonction des coutants et des inductances propres et des inductances mutuelles :

$$\begin{cases} [\phi_{s1}] = [L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r] \\ [\phi_{s2}] = [M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r] \\ [\phi_r] = [M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r] \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Les sous matrices des inductances sont exprimés comme suit :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s1} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Où : $[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T$; $[M_{sr,s1}] = [M_{s1,r}]^T$; $[M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$

Avec : L_{s1}, L_{s2}, L_r : Inductances de fuite de la 1 ère étoile, de la deuxième étoile et du rotor, respectivement; L_{ms}, L_{mr} : Valeurs maximales des coefficients d'inductances mutuelles statorique et rotorique, respectivement; M_{sr} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor; $L_{s1} + L_{ms}$: Inductance propre de la première étoile.

On pose que : $L_{ms} = L_{mr} = L_m$: maximum de l'inductance mutuelle entre la phase statorique et la phase rotorique.

En remplaçant les expressions de flux (II.8) dans les équations des tensions du stator et du rotor, on obtient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} ([L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r]) \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} ([M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r]) \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

On réécrit le système (II.15) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt} ([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt} ([i_{s2}]) + \frac{d}{dt} ([M_{s1,r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt} ([i_r]) \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt} ([i_{s1}]) + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt} ([i_{s2}]) + \frac{d}{dt} ([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt} ([i_r]) \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt} ([i_{s1}]) + \frac{d}{dt} ([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt} ([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt} ([i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Où : } \frac{d}{dt}([M_{s1(2),r}]) = \frac{d\theta_r}{d\theta_r} \cdot \frac{d}{dt}([M_{s1(2),r}]) = \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1(2),r}]) = \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1(2),r}]).$$

Le système d'équation (II.16) devient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1,r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Puis on obtient un système d'Etat qui régit le comportement de la partie électrique de la machine double étoile représentées comme suite :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}([i_{s1}]) = [L_{s1,s1}]^{-1}([v_{s1}] - [r_{s1}][i_{s1}] - [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1,r}])[i_r] - [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \frac{d}{dt}([i_{s2}]) = [L_{s2,s2}]^{-1}([v_{s2}] - [r_{s2}][i_{s2}] - [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] - [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \frac{d}{dt}([i_r]) = [L_{r,r}]^{-1}([v_r] - [r_r][i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] - [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] - [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.4.3 Équation mécanique

Les équations fondamentales mécaniques de rotation du rotor sont, comme suite :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - k\Omega_r \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = P\Omega_r \quad (\text{II.20})$$

Où : J : Moment d'inertie des partie tournantes; C_{em} : Couple électromagnétique ; C_r : Couple résistant (couple de la charge) ; k : Coefficient de frottement visqueux.

II.4.4 Equation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}^T \left[\frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [M_{s1,s2}] & [M_{s1,r}] \\ [M_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [M_{s2,r}] \\ [M_{r,s1}] & [M_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.21.a})$$

D'après les sous matrices des inductances, on trouve que les sous matrices suivantes: $[M_{s1,r}]$ et $[M_{s2,r}]$ dépendent de θ_r ce qui donne une expression simplifiée du couple électromagnétique:

$$C_{em} = P \left\{ [i_{s1}]^T \frac{d}{d\theta_r} [M_{s1,r}] + [i_{s2}]^T \frac{d}{d\theta_r} [M_{s2,r}] \right\} [i_r] \quad (\text{II.21.b})$$

II.5 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le repère (abc)

Les figures II.2 à II.6 montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) avec un décalage de ces sources de 30° suivi de

l'application d'une charge à l'instant $t = 1.5$ s d'une valeur nominale de 100 (N.m) réalisé sur MATLAB/Simulink dans le repère naturel abc, où les paramètres sont donnés dans l'annexe 1.

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente au début des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 195 N.m, puis il diminue d'une façon presque linéaire et il s'annule pour compenser les pertes par frottements puis avec l'application de couple de charge à l'instant $t = 1.5$ s ; on remarque une croissance dans le couple électromagnétique avec une valeur de 98 N.m.

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.3 s qui indique le temps de réponse de la machine puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313 rd/sou 2996 tr/min puis à l'application du couple de charge, on remarque une décroissance avec oscillations jusqu'à une valeur de 296 rd/s ou 2828 tr/min.

Au démarrage, les courants statoriques des étoiles 1 et 2, i_{s1} et i_{s2} passent par un régime transitoire dont les valeurs atteignent une valeur efficace de 94 A. Leurs valeurs sont d'ordre de 61 A. Puis, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 3.5(A), puis à l'instant $t=1.5$ s où on a appliqué la charge, on observe une augmentation des courants statoriques (des deux étoiles) atteint la valeur de 19 (A).

Au démarrage, les courants rotoriques passent par un régime transitoire dont les valeurs maximales sont très grandes ; elles atteignent jusqu'à 134A puis elles diminuent légèrement ; aux environs de $t = 0.5$ s, on remarque que les trois courants rotoriques prennent une valeur proche de 0 A et à $t = 1.5$ s une charge est appliquée, les trois allures augmentent alors instantanément et se stabilisent après quelques dixièmes de seconde à une valeur efficace de 28 A; on remarque aussi que les allures adoptent une forme sinusoïdale équilibrée.

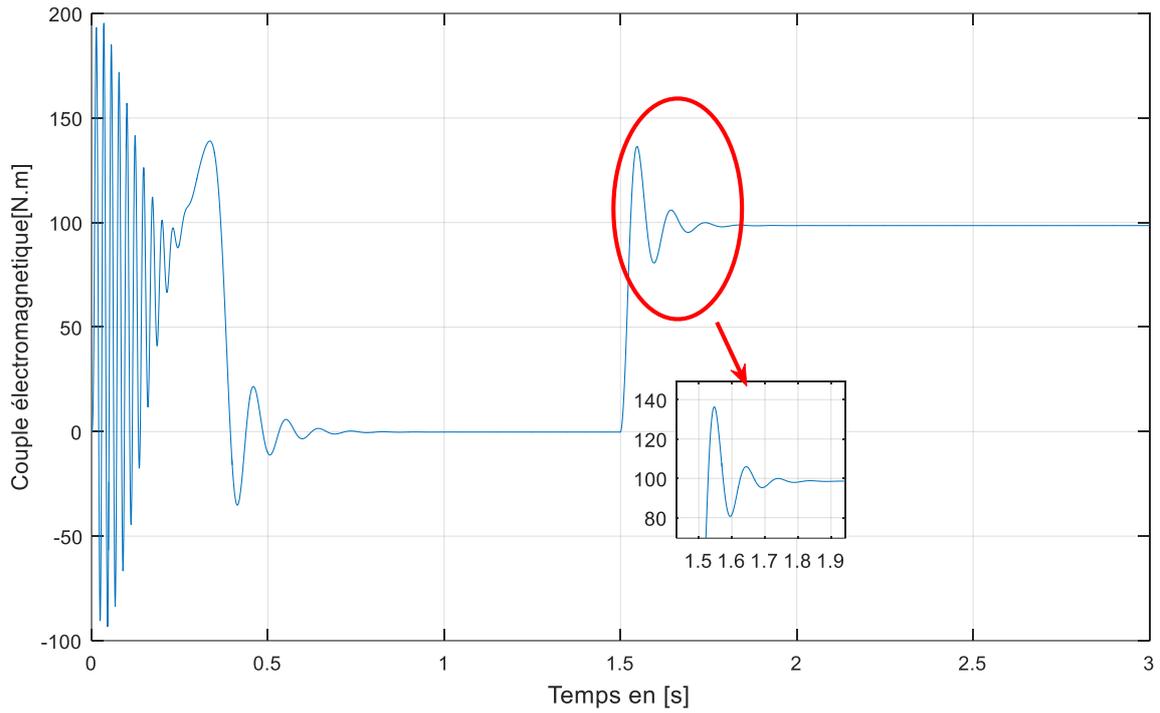


Figure II.2 : Allure du couple électromagnétique à l'état sain dans le repère (abc)

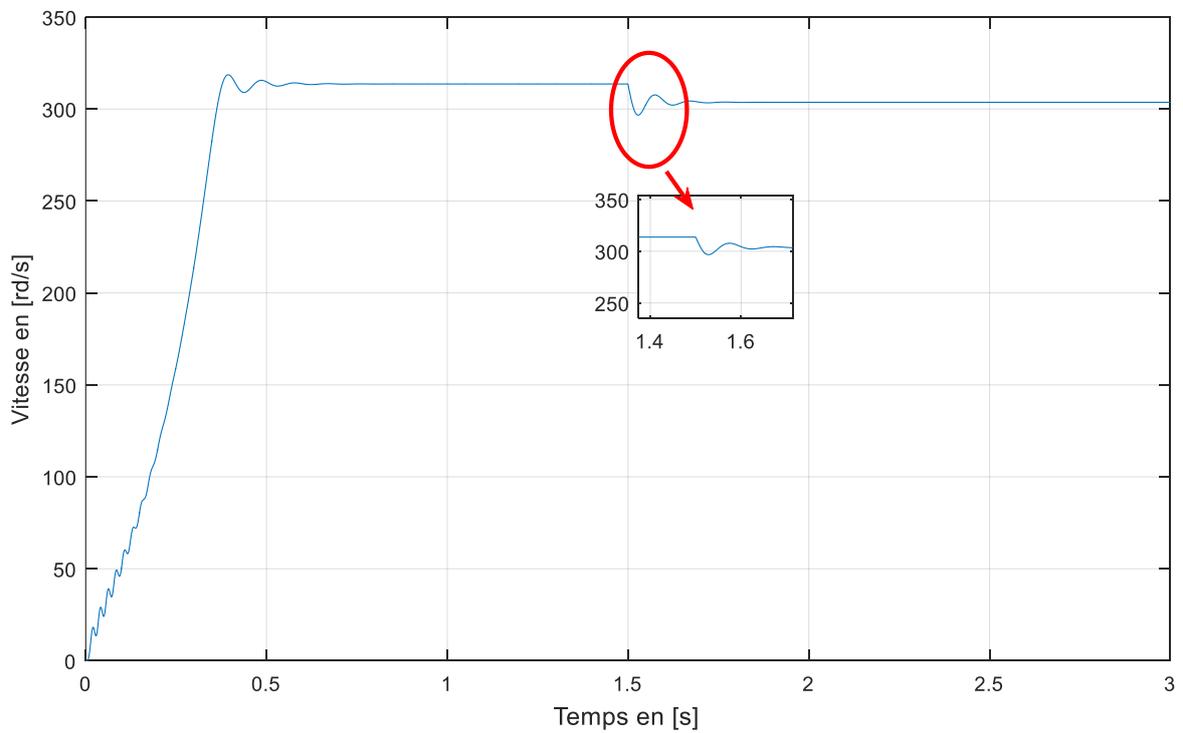


Figure II.3 : Allure de la vitesse à l'état sain dans le repère (abc)

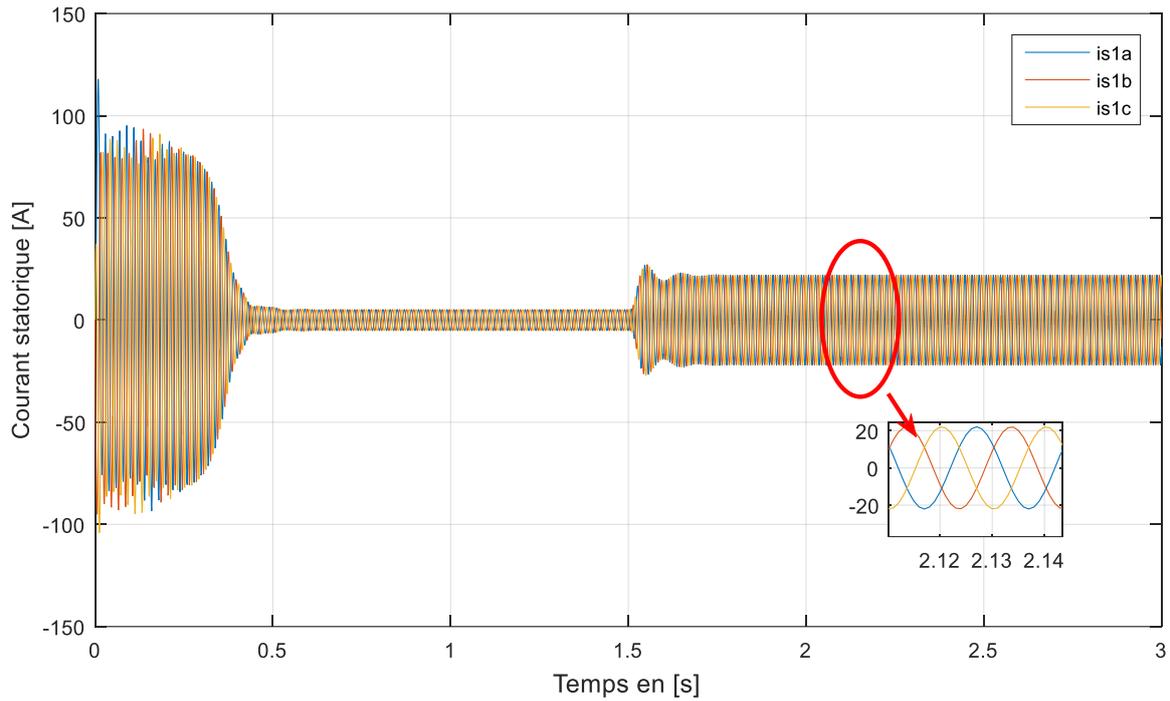


Figure II.4 : Allure des courants statoriques de la première étoile à l'état sain dans le repère (abc)

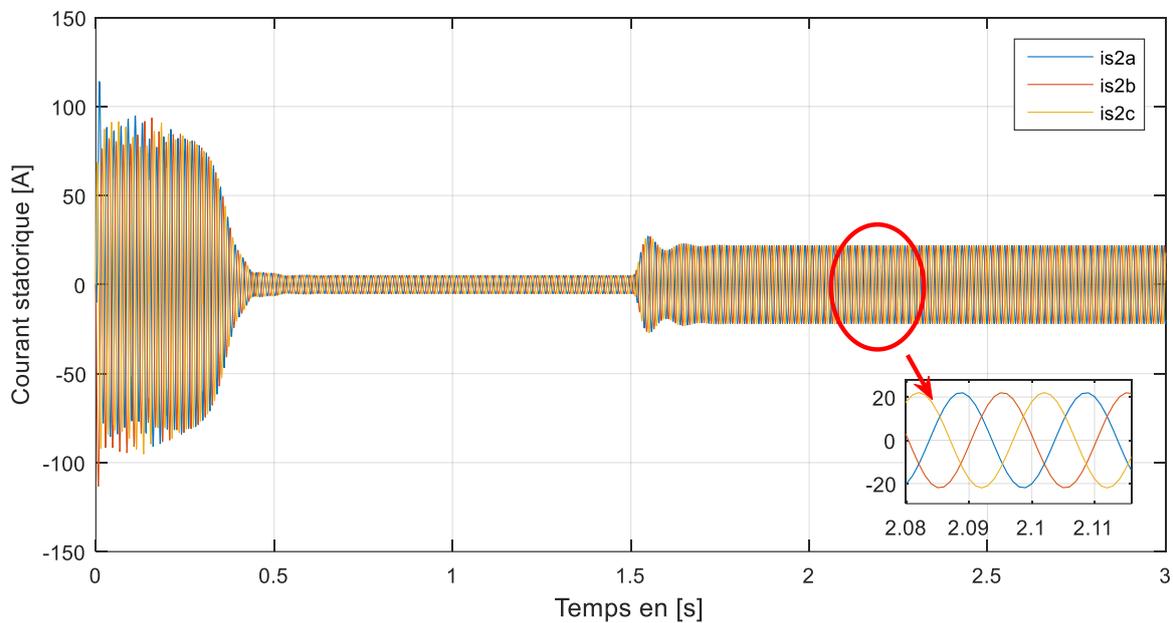


Figure II.5 : Allure des courants statoriques de la deuxième étoile à l'état sain dans le repère (abc)

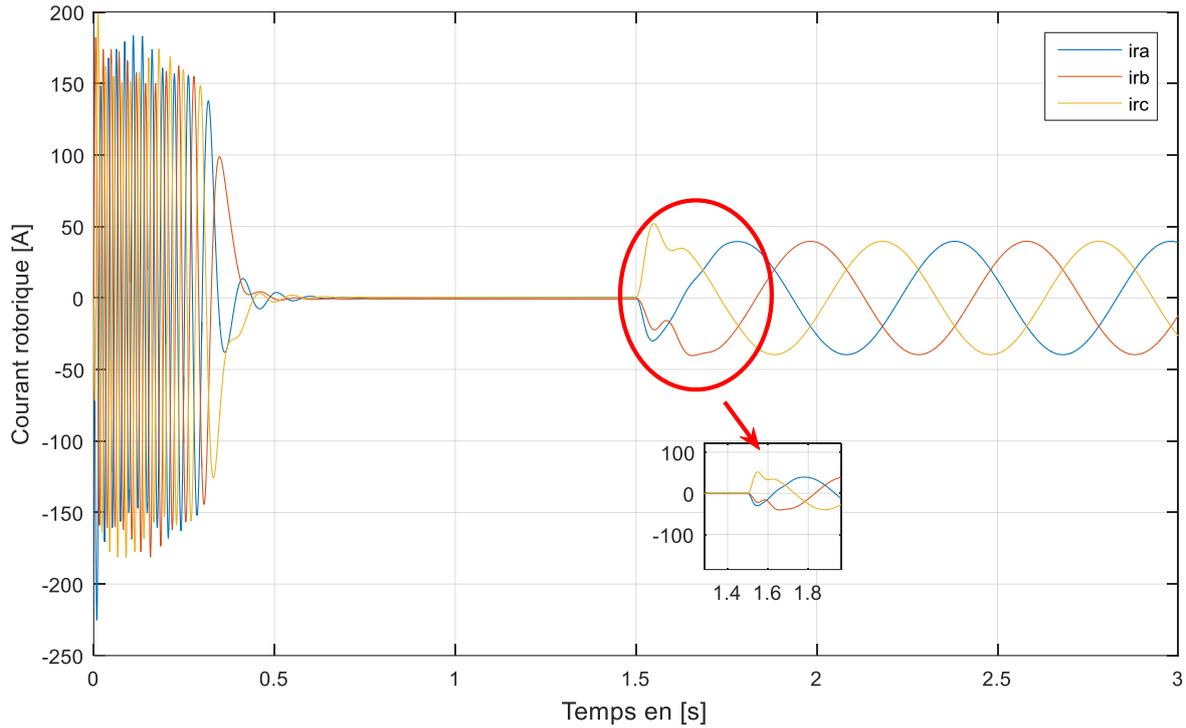


Figure II.6 : Allure des courants rotoriques à l'état sain dans le repère (abc)

II.6 Modèle de la MASDE selon le système d'axes (dqo)

II.6.1 Modèle de Park

Modèle de Park est basé sur la transformation d'un système d'enroulement triphasé statorique d'axes (a, b, c) en un système équivalent à un système biphasé d'axes (d, q, o) et inversement, créant la même force magnétomotrice.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.22}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.23}$$

On représente les deux transformations par les équations suivantes :

$$[G_{dq0}] = [P(\theta)][G_{abc}] \tag{II.24}$$

$$[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[G_{dq0}] \tag{II.25}$$

Avec $[G_{abc}]$ et $[G_{dq0}]$: Vecteurs assemblés des grandeurs du système triphasé équilibré et du système biphasé équilibré, respectivement.

II.6.2 Application de la transformation de Park à la MASDE

a) Équations des tensions

Par l'application de la transformation de Park aux systèmes d'équations de tensions, on obtient :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{coor}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds2} \\ \phi_{qs2} \\ \phi_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d(\theta_{coor}-\alpha)}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds2} \\ \phi_{qs2} \\ \phi_{os2} \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \\ v_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{rcoor}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix} \tag{II.28}$$

Avec : θ_{coor} : Angle constitué par les axes A_{s1} , d ; θ_{rcoor} : Angle constitué par les axes A_r , d ;

$\frac{d\theta_{coor}}{dt} = \omega_{coor}$: Vitesse de rotation du repère (d, q) par rapport au l'étoile 1 ; $\frac{d\theta_{rcoor}}{dt} = \omega_{coor} - \omega_r$: Vitesse de rotation du repère (dqo) par rapport au rotor.

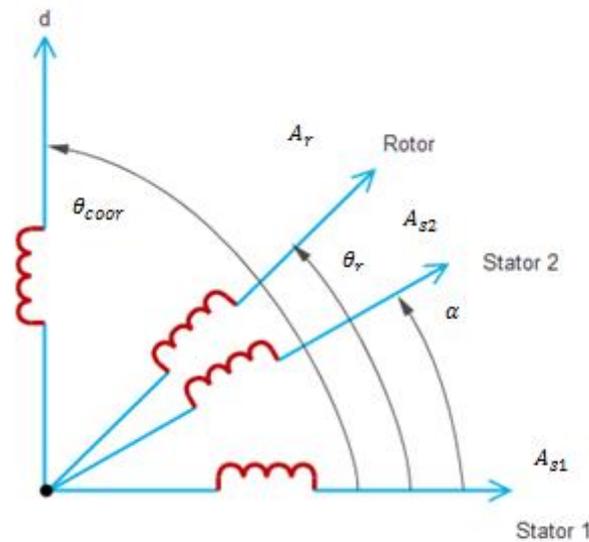


Figure II.7 : Représentation des axes en transformation de Park

En négligeant les homopolaires et en mettant le rotor en court – circuit ($v_{dr} = v_{qr} = 0$), on écrit les expressions (II.26) – (II.28) sous la forme d'un système d'équations (II.29):

$$\begin{cases} v_{ds1} = r_s i_{ds1} + \frac{d}{dt} \phi_{ds1} - \omega_{coor} \phi_{qs1} \\ v_{qs1} = r_s i_{qs1} + \frac{d}{dt} \phi_{qs1} + \omega_{coor} \phi_{ds1} \\ v_{ds2} = r_s i_{ds2} + \frac{d}{dt} \phi_{ds2} - \omega_{coor} \phi_{qs2} \\ v_{qs2} = r_s i_{qs2} + \frac{d}{dt} \phi_{qs2} + \omega_{coor} \phi_{ds2} \\ 0 = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{qr} \\ 0 = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II.29)$$

b) Équations des flux

En appliquant la transformation de Park sur les équations de flux, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{dr} \\ \phi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{qr} \\ \phi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds2} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{dr} \\ \phi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs2} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{ds1} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{ds2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{dr} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{qs1} + \frac{3}{2} M_{sr} i_{qs2} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{qr} \end{cases} \quad (II.30)$$

On pose: $\frac{3}{2} L_{ms} = \frac{3}{2} L_{mr} = \frac{3}{2} M_{sr} = L_m$.

Où : L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1, l'étoile 2 et le rotor.

Le système d'équations (II.30) est réécrit comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (II.31)$$

Avec : $L_{s1} + L_m$, $L_{s2} + L_m$ et $L_r + L_m$: Inductances propres cycliques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor, respectivement.

L'expression du couple électromagnétique s'écrit sous la forme suivante:

$$C_{em} = P(\phi_{ds1} i_{qs1} - \phi_{qs1} i_{ds1} + \phi_{ds2} i_{qs2} - \phi_{qs2} i_{ds2}) \quad (II.32)$$

II.7 Simulation de la MASDE dans le repère (dqo) relié au champ tournant

Dans cette partie, nous avons réalisé un bloc de simulation de la MASDE dans le repère (dqo) sous l'environnement MATLAB/ Simulink, à partir du développement mathématique précédent des équations électriques et mécaniques et transformation de Park (directe et inverse), où la MASDE est alimentée par

deux sources purement sinusoïdales et équilibrées et décalés d'un angle de 30° , suivi d'une visualisation des grandeurs (courants statoriques des deux étoiles et rotoriques, vitesse de rotation et couple électromagnétique). Ainsi, les résultats obtenus sont affichés et commentés.

Les figures (II.8 à II.12) montrent les résultats de simulations lors du démarrage à vide de la MASDE, puis l'introduction d'une charge nominale de 100Nm à $t = 1.5s$. D'après les résultats qu'on a obtenus dans la simulation (dqo), on remarque que les résultats sont identiques avec les résultats de simulations dans le repère (abc), vitesse de rotation, couple électromagnétique, courants statoriques des deux étoiles et rotorique, sont représentés dans les figures (II.2 à II.6) et les figures (II.8 à II.12), respectivement.

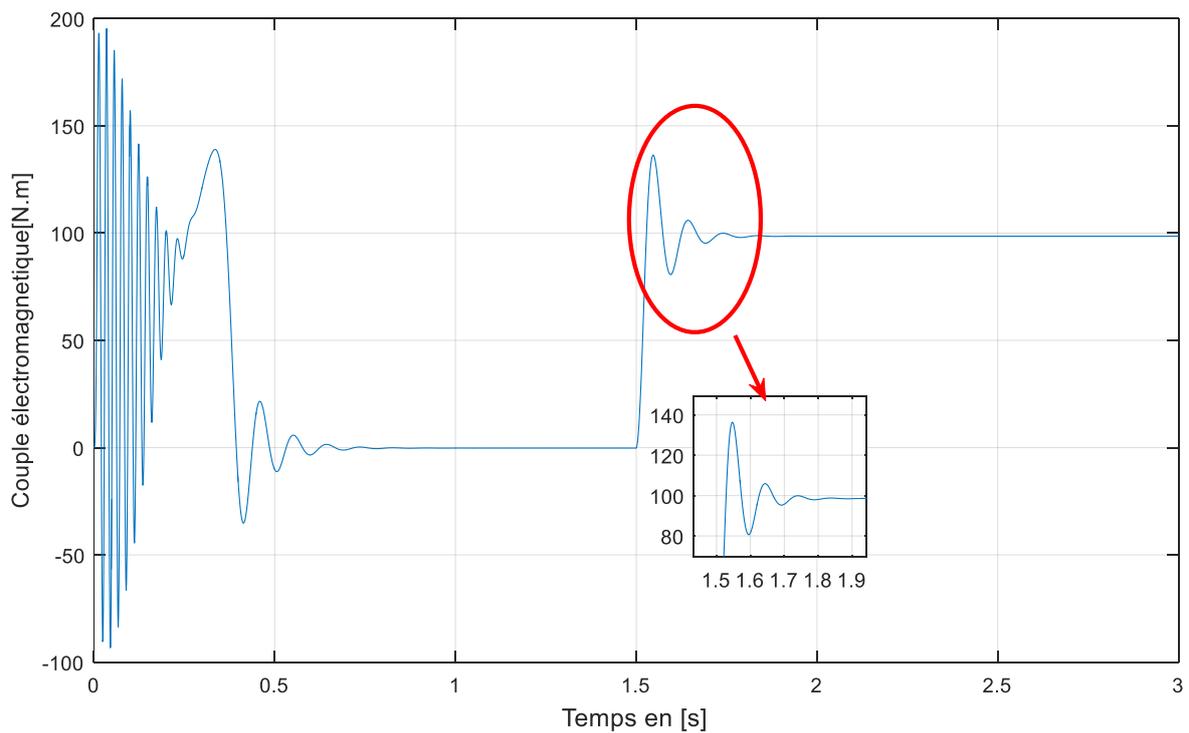


Figure II.8: Allure du couple électromagnétique à l'état sain dans le repère (dqo)

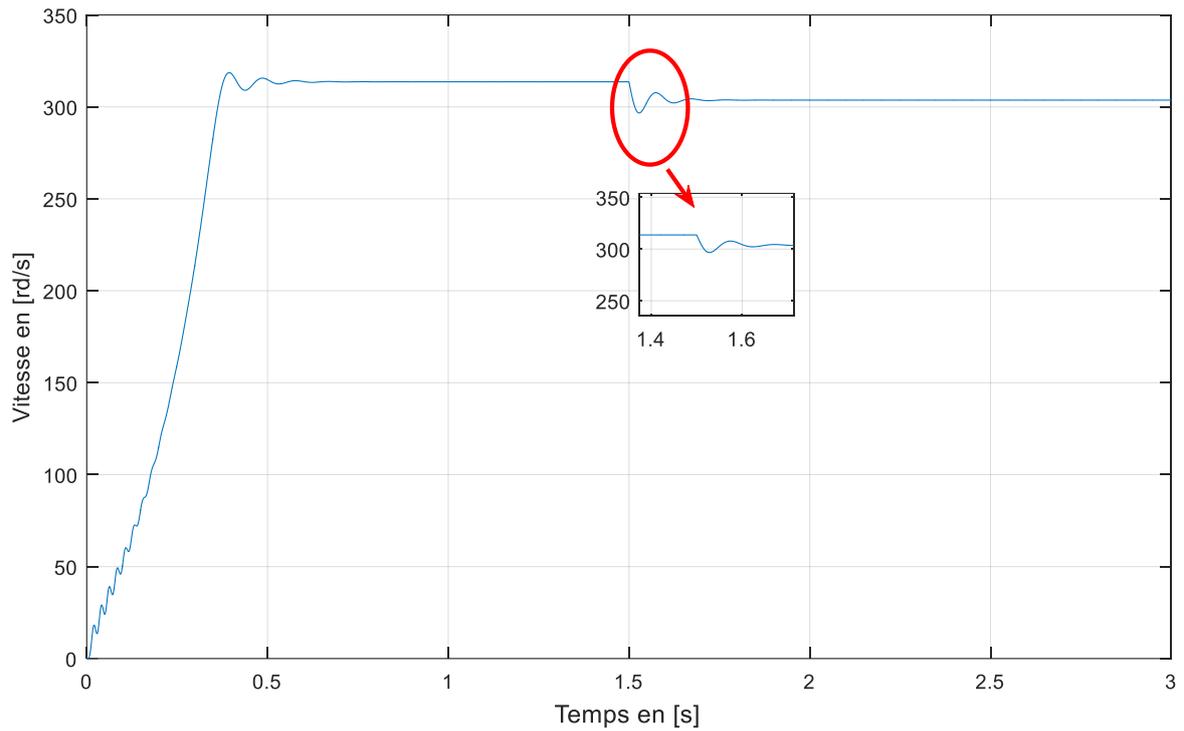


Figure II.9 : Allure de la vitesse de rotation à l'état sain dans le repère (dq0)

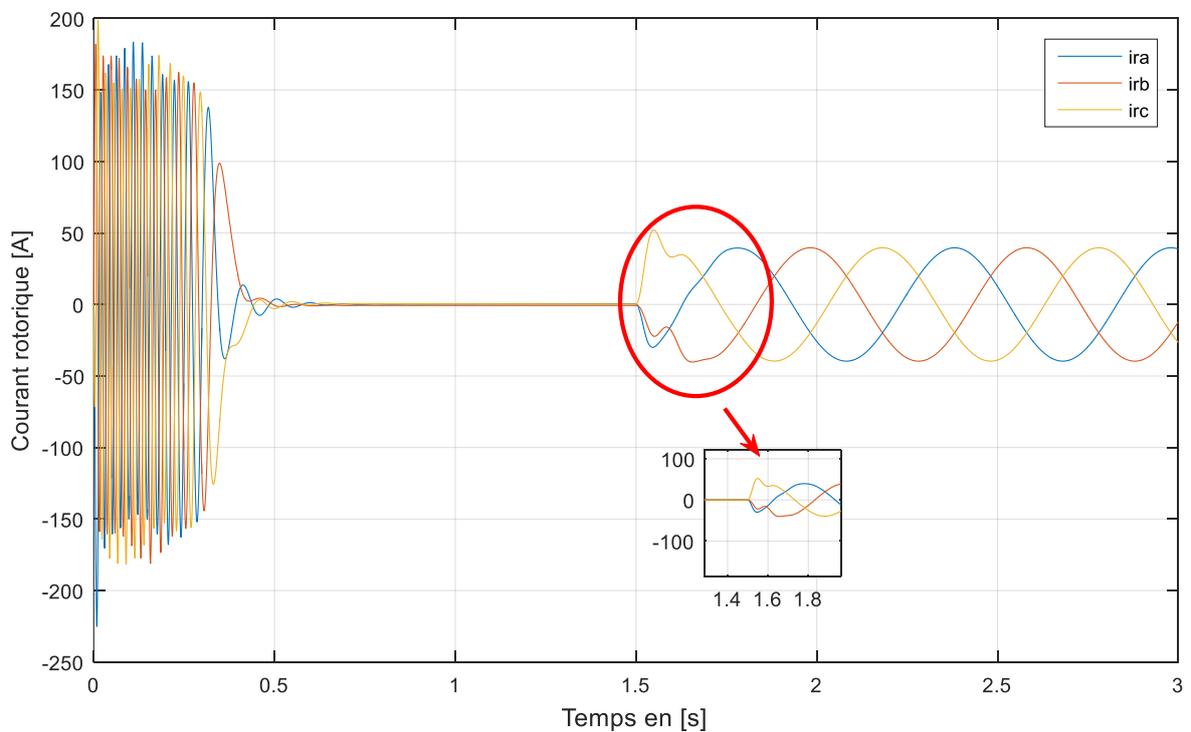


Figure II.10: Allure des courants rotorique à l'état sain dans le repère (dq0)

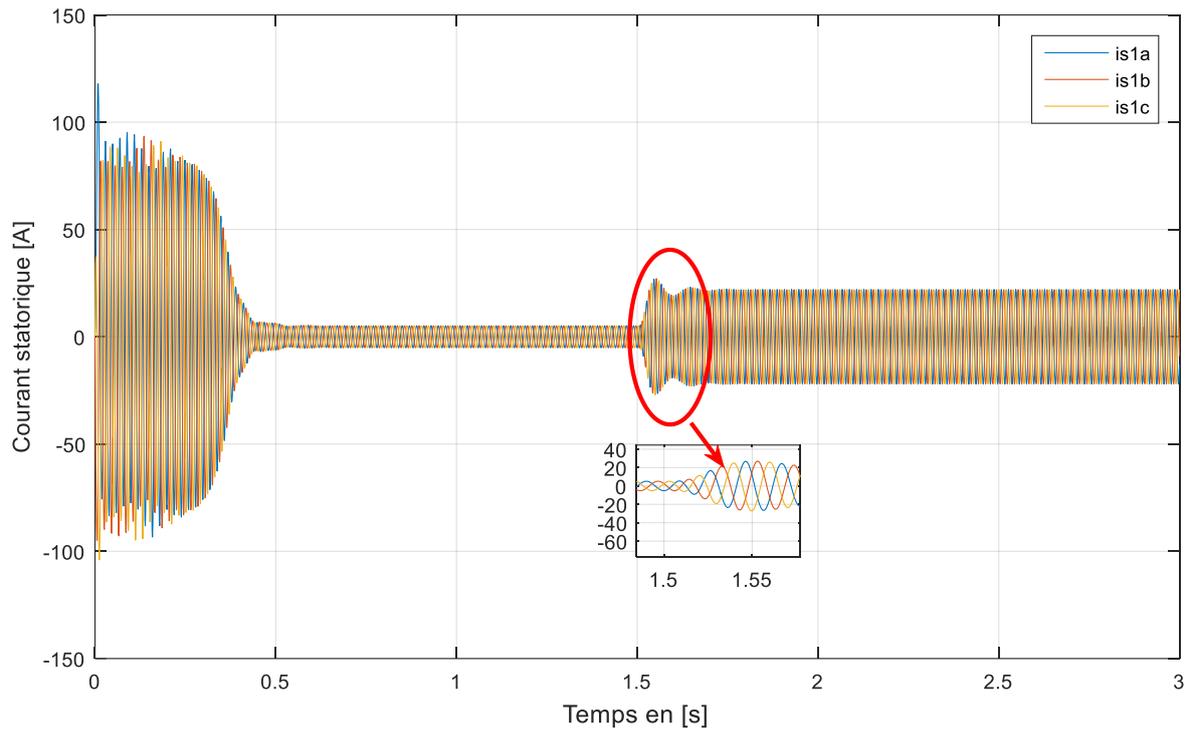


Figure II.11 : Allure des courants statoriques de la première étoile à l'état sain dans le repère (dq0)

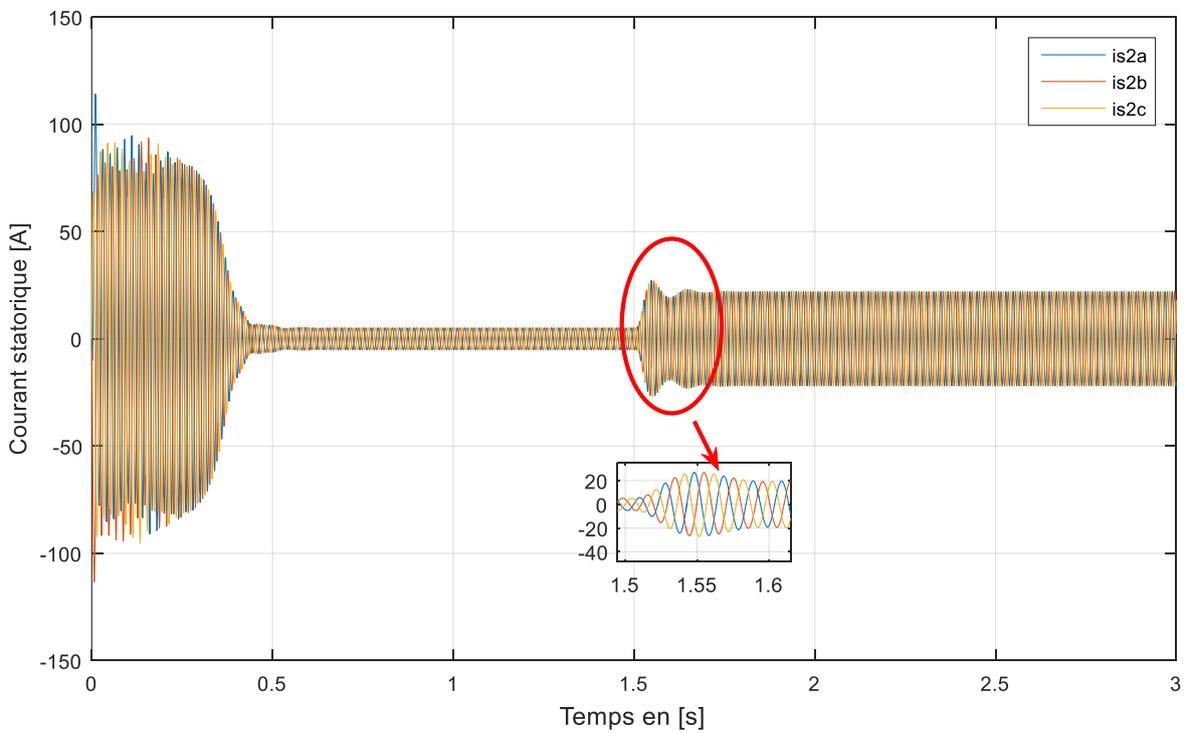


Figure II.12 : Allure des courants statoriques de la deuxième étoile à l'état sain dans le repère (dq0)

II.9 Analyse spectrale dans le repère (abc)

II.9.1 Analyse spectrale du courant statorique de la phase 1 (as)

On a effectué une analyse spectrale du courant d'une phase statorique de la première étoile de la MASDE dans l'état sain en régime permanent, et nous avons constaté un pic dont la fréquence est égale à la fréquence de synchronisme 50 Hz, comme montre la figure (II.13).

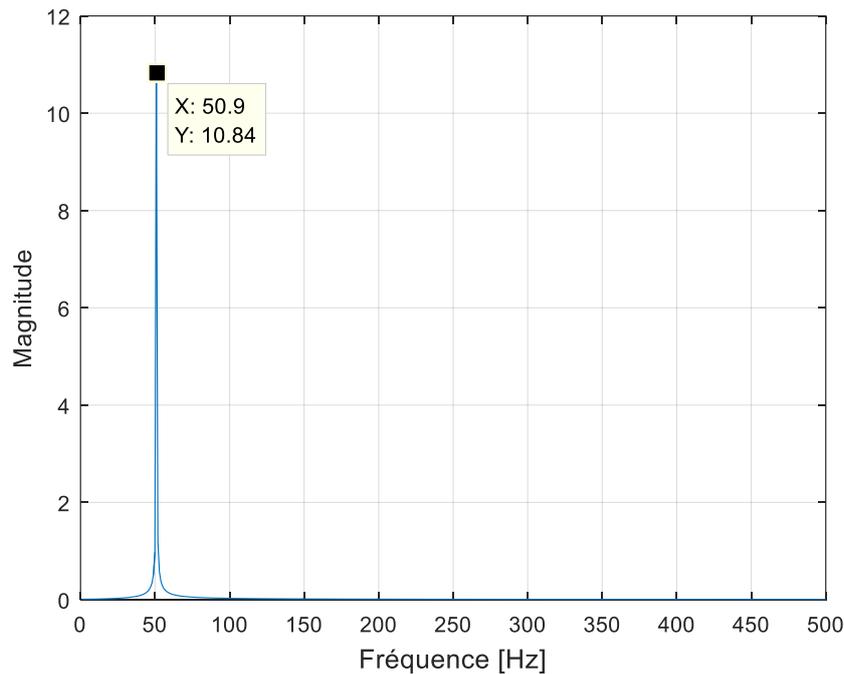


Figure II.13 : Spectre du courant d'une phase statorique de la première étoile de la MAS à l'état sain

II.9.2 Analyse spectrale du couple et de la vitesse

Une analyse spectrale du couple et de la vitesse de la MASDE dans l'état sain est établie en régime permanent. Sur les spectres montrés dans les figures (II.14) et (II.15), nous relevons la présence de la composante fréquentielle continue, confirmant ainsi qu'avec les considérations prises, ces grandeurs sont des signaux continus.

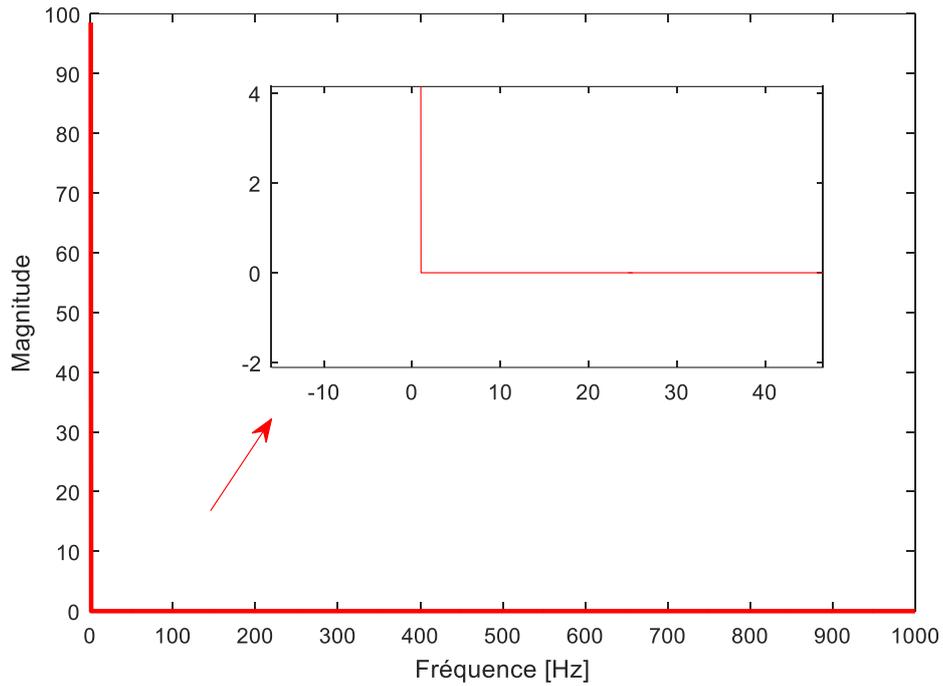


Figure II.14: Spectre du couple électromagnétique à l'état sain

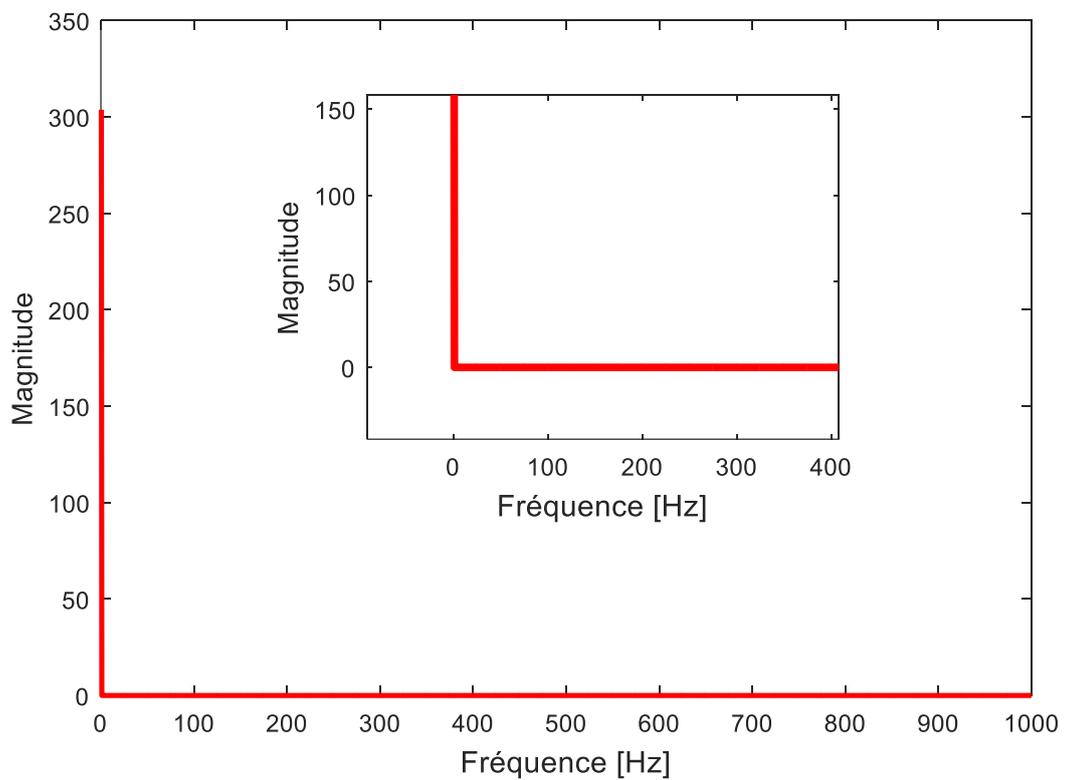


Figure II.15: Spectre de la vitesse à l'état sain

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone double étoile dans les deux repères naturel (abc) et virtuel (dqo) en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Nous avons simulé la MASDE sous l'environnement MATLAB/Simulink, dans les repères naturel et virtuel et nous avons remarqué que les résultats de simulation dans les repères abc et dqo sont identiques pour les deux modèles. Ainsi, le modèle dans le repère naturel nous permettra d'effectuer de nouvelles simulations avec la présence de défauts (régime dégradé). Par ailleurs, l'analyse spectrale nous permettra de faire une comparaison des résultats de ces simulations dans le dernier chapitre, car nous avons besoin de cette dernière pour mieux comprendre l'influence des défauts sur les grandeurs de la MASDE étudiée.

Chapitre III

Modèle de la MASDE

en présence des

défauts rotoriques et

statoriques

III.1) Introduction

Dans ce chapitre, nous avons fait la modélisation et la simulation de la MASDE en présence des différents défauts statoriques et rotoriques dans le repère naturel (abc). Le premier défaut traitera l'ouverture d'une ou plusieurs phases statorique ou rotorique et l'autre défaut sera un court-circuit entre spires d'une phase statorique. A la fin, on fera une analyse spectrale des signaux de cette machine pour chaque type de défauts, pour suivre l'évolution de ces derniers et les changements sur les grandeurs du courant, de la vitesse et du couple électromagnétique.

III.2) Paramètre du rotor de la machine étudié

On peut présenter le rotor bobiné comme un bobinage polyphasé de même nombre de pair de pôles que le stator, c'est un bobinage triphasé connecté généralement en étoile et relié à trois bagues fixées sur l'arbre et sur lesquelles frottent des balais fixes sur le stator, d'où l'on branche un rhéostat ou un convertisseur statique de fréquence afin d'améliorer les performances de démarrage c'est-à-dire d'avoir un couple électromagnétique élevé et un faible appel de courant statorique. La figure III.1 montre un rotor d'une MAS à rotor bobiné.

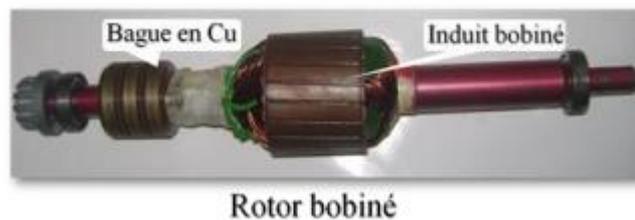


Figure III.1: Photo d'un rotor bobiné d'une MAS

III.2) Modélisation de la MASDE avec défaut de l'ouverture d'une phase statorique et rotorique

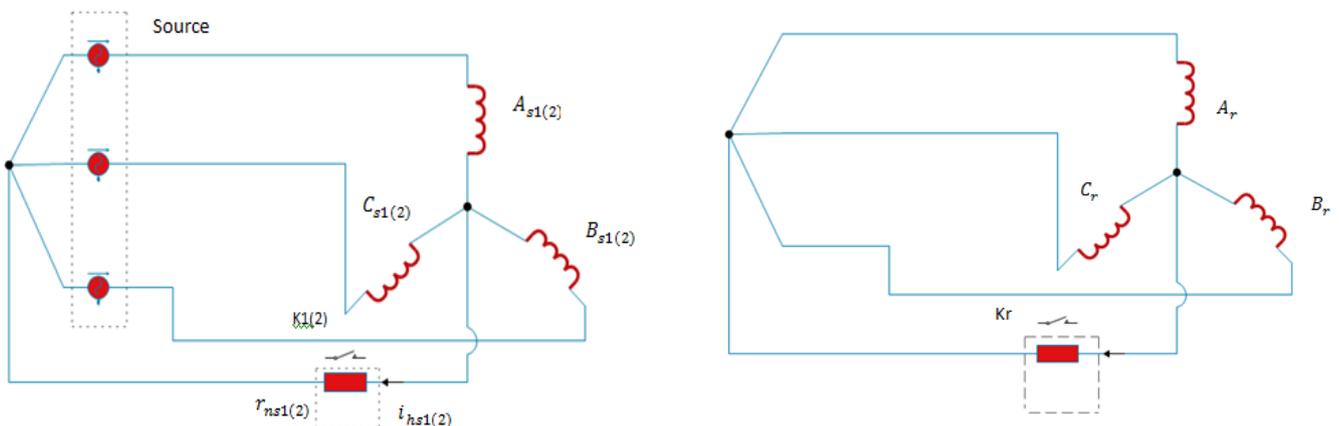


Figure III.2 Schéma de connexions des différentes phases statoriques et rotoriques

III.3.1) Equations électriques de la MASDE

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MASDE dans le repère abc représentent pour ces enroulements sont les sommes des chutes ohmique et inductive due au flux.

$$\text{Pour l'étoile 1 statorique : } \begin{cases} v_{as1} - v_{ns1} = r_{as1}i_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} - v_{nc1} \\ v_{bs1} - v_{ns1} = r_{bs1}i_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1}}{dt} - v_{nc1} \\ v_{cs1} - v_{ns1} = r_{cs1}i_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} - v_{nc1} \end{cases} \quad (\text{III.1.a})$$

On réécrit le système III.1.a sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{as1} = r_{as1}i_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} + \Delta v_{ns1} \\ v_{bs1} = r_{bs1}i_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1}}{dt} + \Delta v_{ns1} \\ v_{cs1} = r_{cs1}i_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} + \Delta v_{ns1} \end{cases} \quad (\text{III.1.b})$$

Avec : $\Delta v_{ns1} = v_{ns1} - v_{nc} = r_{ns1} \left(\frac{i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}}{i_{hs1}} \right)$: Différent potentiel et potentiels de la source et de la charge, respectivement ; r_{ns1} et i_{hs1} : Résistance et courant homopolaire entre deux neutres au stator1.

$$\text{Pour l'étoile 2 statorique : } \begin{cases} v_{as2} - v_{ns2} = r_{as2}i_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} - v_{nc} \\ v_{bs2} - v_{ns2} = r_{bs2}i_{bs2} + \frac{d\phi_{bs2}}{dt} - v_{nc} \\ v_{cs2} - v_{ns2} = r_{cs2}i_{cs2} + \frac{d\phi_{cs2}}{dt} - v_{nc} \end{cases} \quad (\text{III.2.a})$$

On réécrit aussi le système III.2.a sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{as2} = r_{as2}i_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} + \Delta v_{ns2} \\ v_{bs2} = r_{bs2}i_{bs2} + \frac{d\phi_{bs2}}{dt} + \Delta v_{ns2} \\ v_{cs2} = r_{cs2}i_{cs2} + \frac{d\phi_{cs2}}{dt} + \Delta v_{ns2} \end{cases} \quad (\text{III.2.b})$$

Avec : $\Delta v_{ns2} = v_{ns2} - v_{nc} = r_{ns2} \left(\frac{i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}}{i_{hs2}} \right)$: Différent potentiel et potentiels de la source et de la charge, respectivement ; r_{ns2} et i_{hs2} : Résistance et courant homopolaire entre deux neutres au stator2.

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} v_{Ar} - v_{Nr} = r_{Ar}i_{Ar} + \frac{d\phi_{Ar}}{dt} - v_{Nc} \\ v_{Br} - v_{Nr} = r_{Br}i_{Br} + \frac{d\phi_{Br}}{dt} - v_{Nc} \\ v_{Cr} - v_{Nr} = r_{Cr}i_{Cr} + \frac{d\phi_{Cr}}{dt} - v_{Nc} \end{cases} \quad (\text{III.3.a})$$

On réécrit aussi le système III.3.a sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{Ar} = r_{Ar}i_{Ar} + \frac{d\phi_{Ar}}{dt} + \Delta v_{Nr} \\ v_{Br} = r_{Br}i_{Br} + \frac{d\phi_{Br}}{dt} + \Delta v_{Nr} \\ v_{Cr} = r_{Cr}i_{Cr} + \frac{d\phi_{Cr}}{dt} + \Delta v_{Nr} \end{cases} \quad (\text{III.3.b})$$

Avec : $\Delta v_{Nr} = v_{Nr} - v_{Nc} = r_{Nr} \left(\frac{i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}}{i_{Hr}} \right)$: Différent potentiel et le deux potentiels, respectivement ;
 ; r_{Nr} et i_{Hr} : Résistance et courant homopolaire entre deux neutres rotoriques.

Où : r_{ns1} , r_{ns2} et r_{Nr} prennent les valeurs infinies (très grandes valeurs) lorsque les neutres ne sont pas reliés et les valeurs égales à zéros lorsque les neutres sont reliés comme illustré dans la figure III.2

Où : r_{ns1} , r_{ns2} et r_{Nr} prennent les valeurs infinies (très grandes valeurs) lorsque les neutres ne sont pas reliés et les valeurs égales à zéros lorsque les neutres sont reliés.

III.3.2) Equations magnétiques dans le repère abc

Les expressions des flux statoriques et rotorique sont données par la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\phi_{s1}] = [L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r] \\ [\phi_{s2}] = [M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r] \\ [\phi_r] = [M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r] \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Avec:

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} Z_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix}; \quad (\text{III.7})$$

Les matrices des inductances de couplage entre les deux étoiles statoriques et le rotor et inversement et s'écrivent :

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T; [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T; [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$$

En introduisant les expressions des flux (III.4) dans les équations des tensions de la première étoile, de la deuxième étoile et du rotor, on obtient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt}([L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r]) + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt}([M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r]) + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}([M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r]) + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Où : I_3 : Matrice d'identité (3 x 3).

On réécrit le système (III.11) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \frac{d}{dt}([M_{s1,r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \frac{d}{dt}([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \frac{d}{dt}([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Comme les inductances mutuelles stator/rotor ne dépendent pas du temps mais de θ_r , on établit un changement de variable, d'où l'équation (III.12) devient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1,r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Où : } \frac{d[M_{s1(2),r}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{d\theta_r} \cdot \frac{d[M_{s1(2),r}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{s1(2),r}]}{d\theta_r} = \omega_r \cdot \frac{d[M_{s1(2),r}]}{d\theta_r}$$

Le système d'équations (III.13) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}([i_{s1}]) = [L_{s1,s1}]^{-1}([v_{s1}] - [r_{s1}][i_{s1}] - [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1r}])[i_r] - [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad - r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}).I_3) \\ \frac{d}{dt}([i_{s2}]) = [L_{s2,s2}]^{-1}([v_{s2}] - [r_{s2}][i_{s2}] - [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] - [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad - r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}).I_3) \\ \frac{d}{dt}([i_r]) = [L_{r,r}]^{-1}([v_r] - [r_r][i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] - [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] - [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) \\ \quad - r_{nr}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}).I_3) \end{array} \right. \quad (\text{III.14})$$

III.3.3) Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = P[i_{s1}]^T \frac{d}{d\theta_r} \{ [M_{s1,r}][i_r] \} + P[i_{s2}]^T \frac{d}{d\theta_r} \{ [M_{s2,r}][i_r] \} \quad (\text{III.15})$$

III.3.4) Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega_r) \quad (\text{III.16})$$

Avec: $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$: Vitesses de rotation mécanique et électrique, respectivement ; J : Moment d'inertie des masses tournantes ; C_r : Couple résistant ; K_f : Coefficient de frottement visqueux.

III.3.5) Simulation et interprétations des résultats de la MASDE avec défauts d'ouverture de phases dans le repère naturel (abc)

1) Dans le cas de l'ouverture de la phase As1 statorique

Les figures III.3 à III.7 montrent les résultats de simulation de la MASDE en présence de défauts en ouverture d'une phase statorique dans les deux cas de neutre relié et non relié.

Dans un premier temps, on fait un démarrage à l'état sain (à vide) puis on ajoute une charge à l'instant $t=1s$, puis à l'instant $t=1.5s$, on introduit un défaut dans la 1^{ère} phase statorique, (on note que nous sommes dans le premier cas du neutre relié)

On observe les changements suivants :

- La figure III.3 représente l'allure des courants statoriques 1 : après la période transitoire provoquée par l'application du défaut cité ci-dessus, l'amplitude des allures de i_{s1b} et de i_{s1c} devient plus grande par contre celle de i_{s1a} est devenue nulle, à l'instant $t=2s$ (le cas de neutre non relié) on remarque la diminution de l'amplitude des courants i_{s1a} et i_{s1b} pour reprendre approximativement la même valeur que celle qu'elle avait dans son état sain (20A) ;
- La figure III.4 montre l'évolution de l'allure des courants statoriques 2, on y observe l'augmentation

Chapitre III : Modèle de la MASDE en présence des défauts statoriques et rotoriques

de l'amplitude des courants statoriques de l'étoile 2 par rapport à celle de son état sain mais aussi un déséquilibre dans les trois phases où la valeur de l'une des phases est légèrement inférieure à celle des deux autres mais dans le cas de neutre relié la valeur de l'amplitude augmente pour presque atteindre le double de sa valeur à l'état sain (40A) ;

- Les figures III.5 - III.7 sont respectivement les allures des courants rotorique, la vitesse et le couple électromagnétique: On remarque que ces dernières, qui étaient lisses dans leur état sain deviennent perturbées dès l'application du défaut (apparition d'ondulations), tandis qu'on remarque une perturbation encore plus grande dans le cas de neutre non relié (ondulations avec amplitude plus grande).

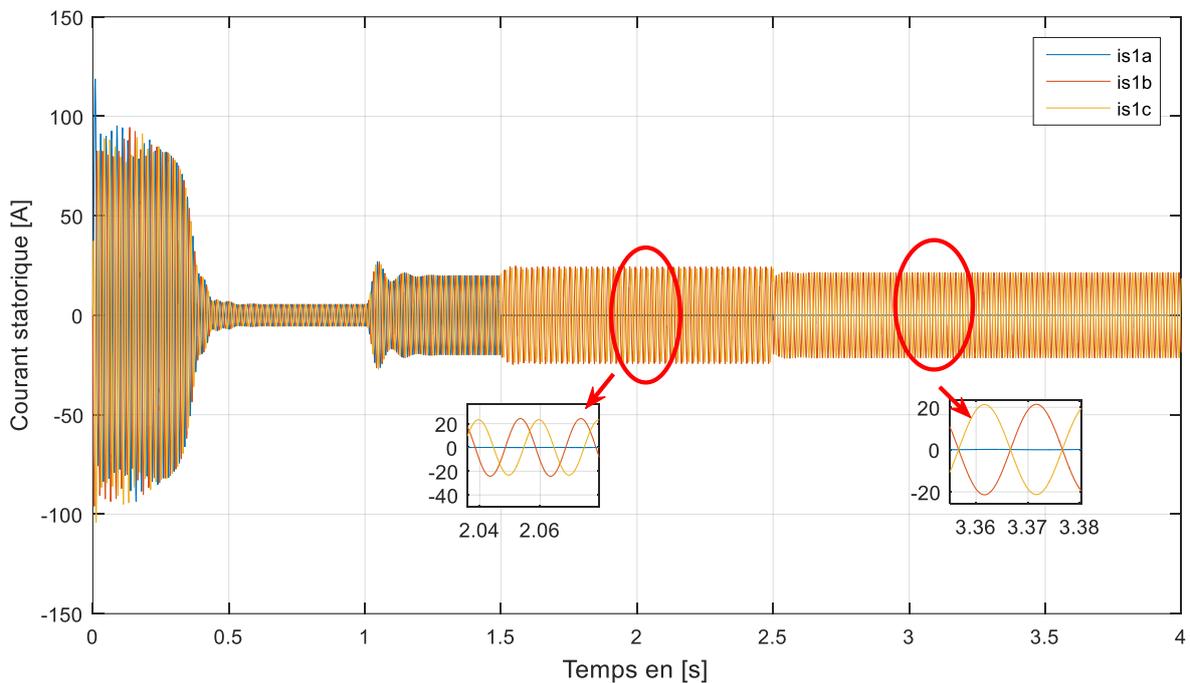


Figure III.3 : Allure des courants statoriques 1 avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié

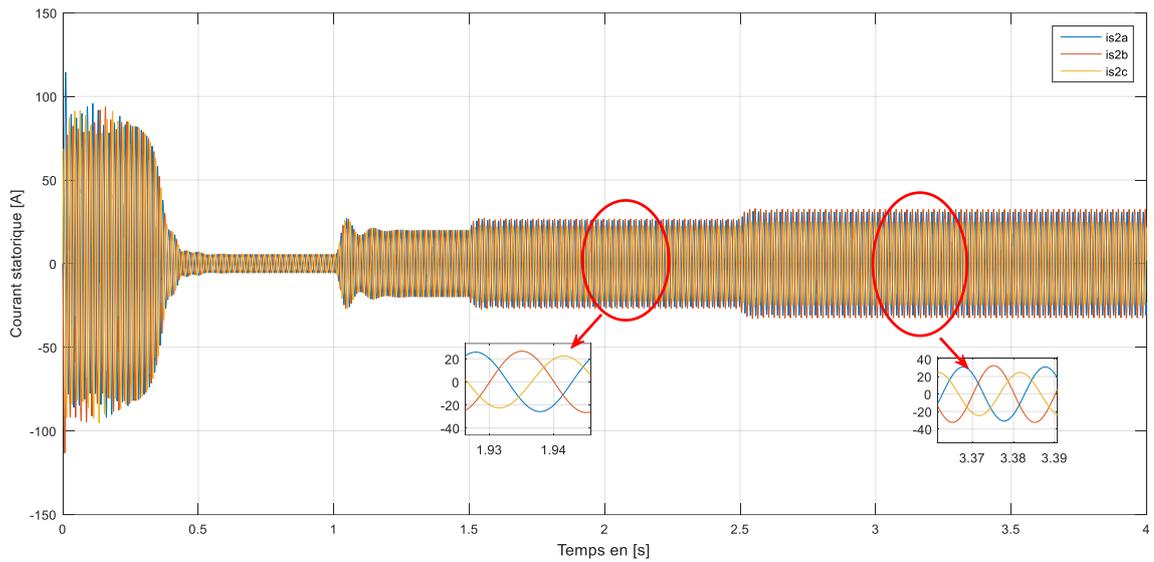


Figure III.4 : Allure des courants de la 2^{ème} étoile avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans le cas des neutres relié et non relié

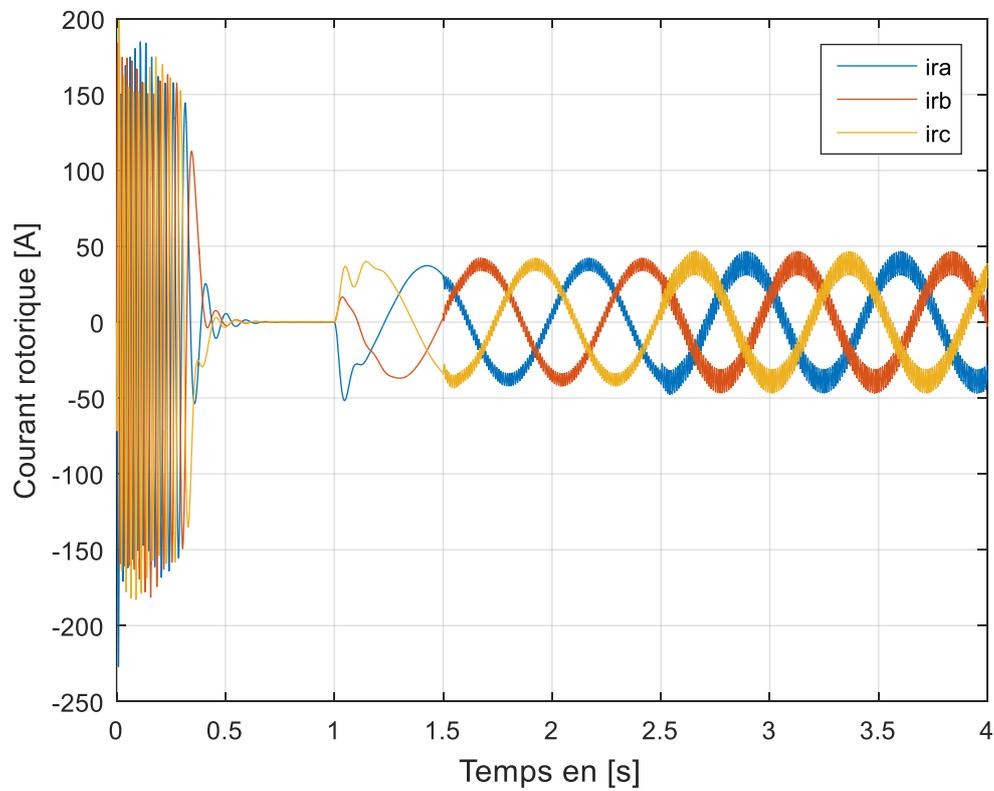


Figure III.5 : Allure des courants rotoriques avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans les cas des neutres relié et non relié

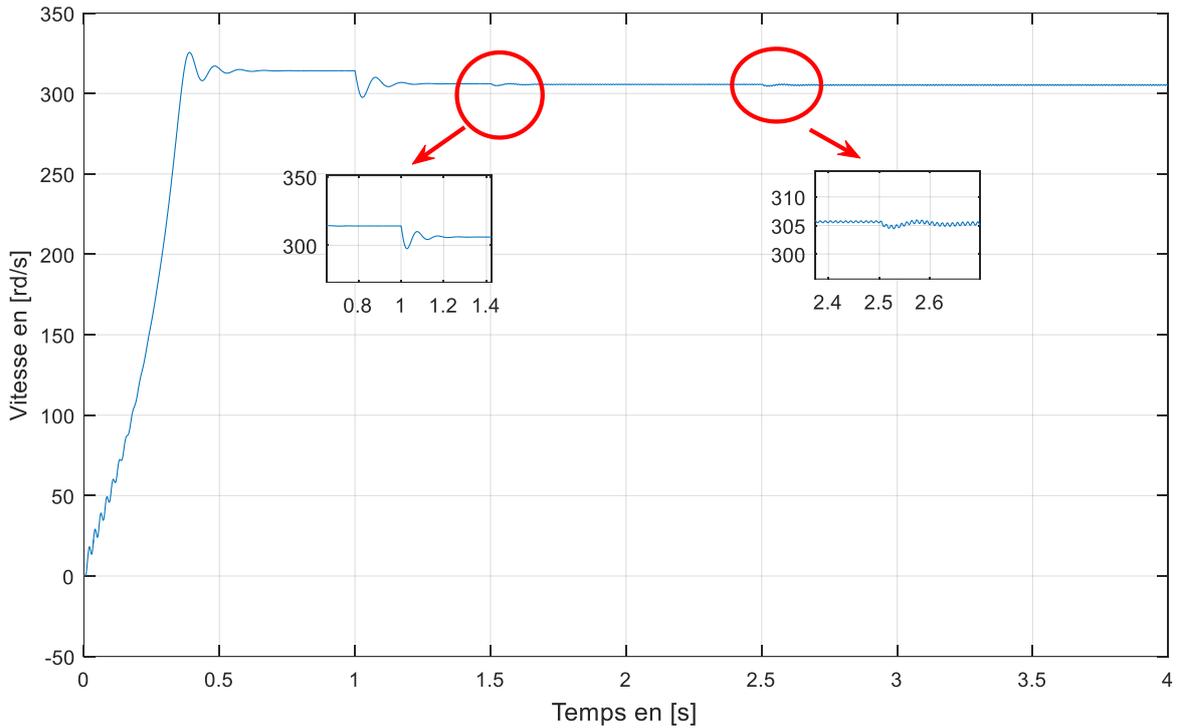


Figure III.6 : Allure de la vitesse avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans les cas de neutre relié et non relié

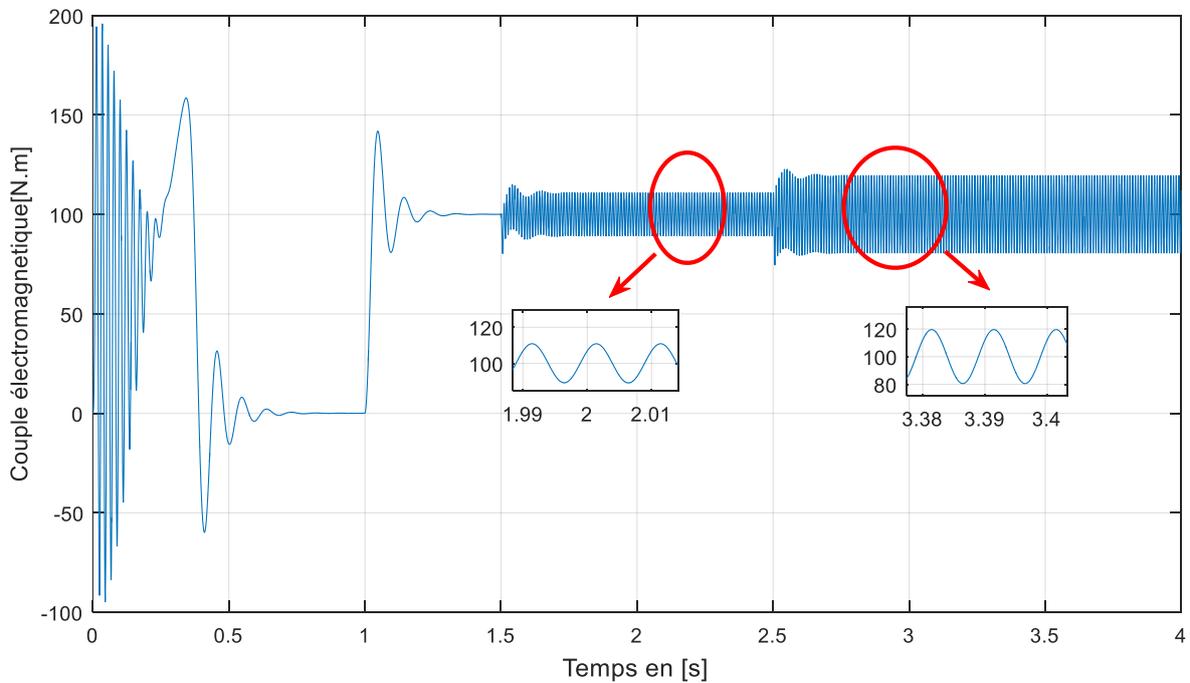


Figure III.7 : Allure du couple électromagnétique avec défaut d'ouverture de la première phase statorique dans les cas de neutre relié et non relié

Les figures III.8-III.11 montrent les résultats de simulation de la MASDE en présence de défauts en ouverture de la phase rotorique (i_{r1}) dans les deux cas de neutres relié et non relié.

Chapitre III : Modèle de la MASDE en présence des défauts statoriques et rotoriques

Comme la simulation précédente, on refait un démarrage à l'état sain (à vide) on relie les neutres puis on ajoute une charge à l'instant $t=1s$, à l'instant $t=1.5s$ on applique un défaut dans la première phase rotorique puis à $t=2.5s$ on applique le cas de neutre non relié, on observe les changements suivants :

- Les figures III.8 et III.9 représente respectivement les allures statorique: l'application de défaut rotorique affecte les courants statorique de deux étoiles et on observe une perturbation dans leurs allures. Les défauts préalablement observé s'accroissent lors de cas de neutre non relié et des pics plus importants sont observés (plus moins 46 A) ;
- La figure III.10 représente l'allure des courants rotoriques, on observe que les courants rotorique à l'application des défauts rotorique deviennent complètement aléatoire et non périodique tandis qu'au cas de neutre non relié les allures s'organisent et redevient périodique mais leur somme égale à 0 ;
- Les figures III.11 et III.12 représentent respectivement les allures du couple et de la vitesse : on remarque que les allures du couple et de la vitesse sont extrêmement perturbées par rapport à la simulation précédente (défaut statorique).

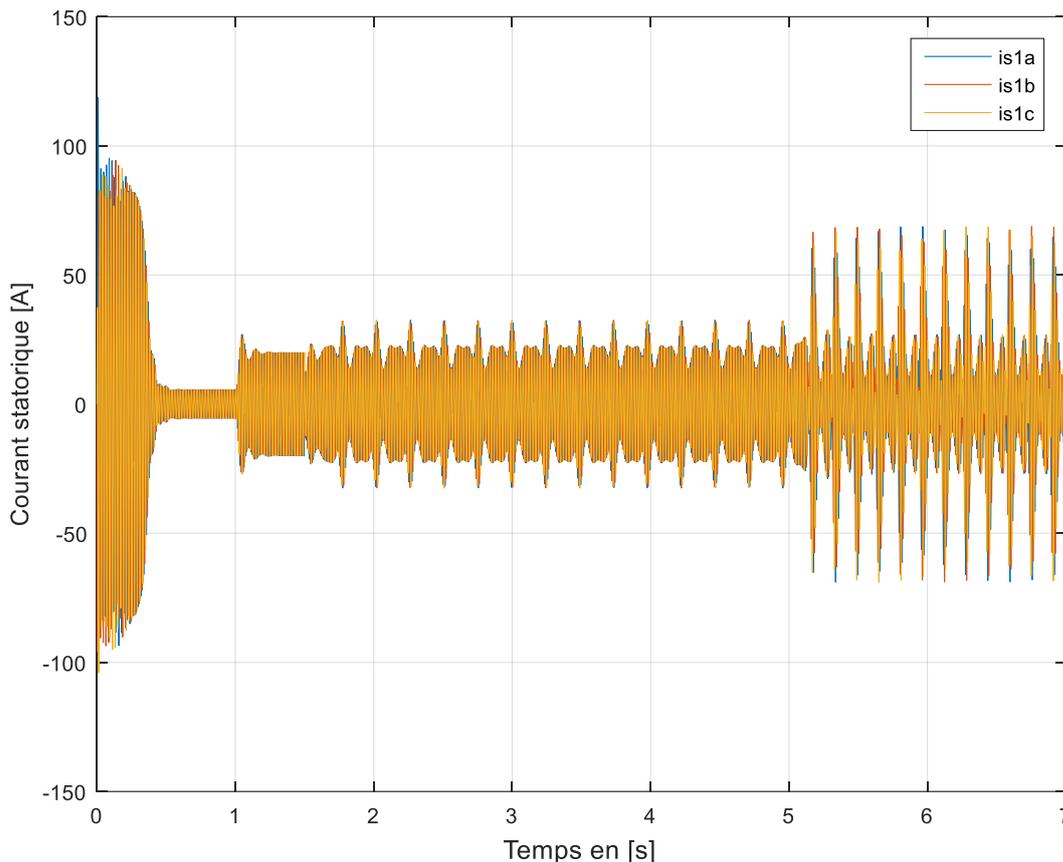


Figure III.8 : Allure des courants statoriques de l'étoile 1 avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié

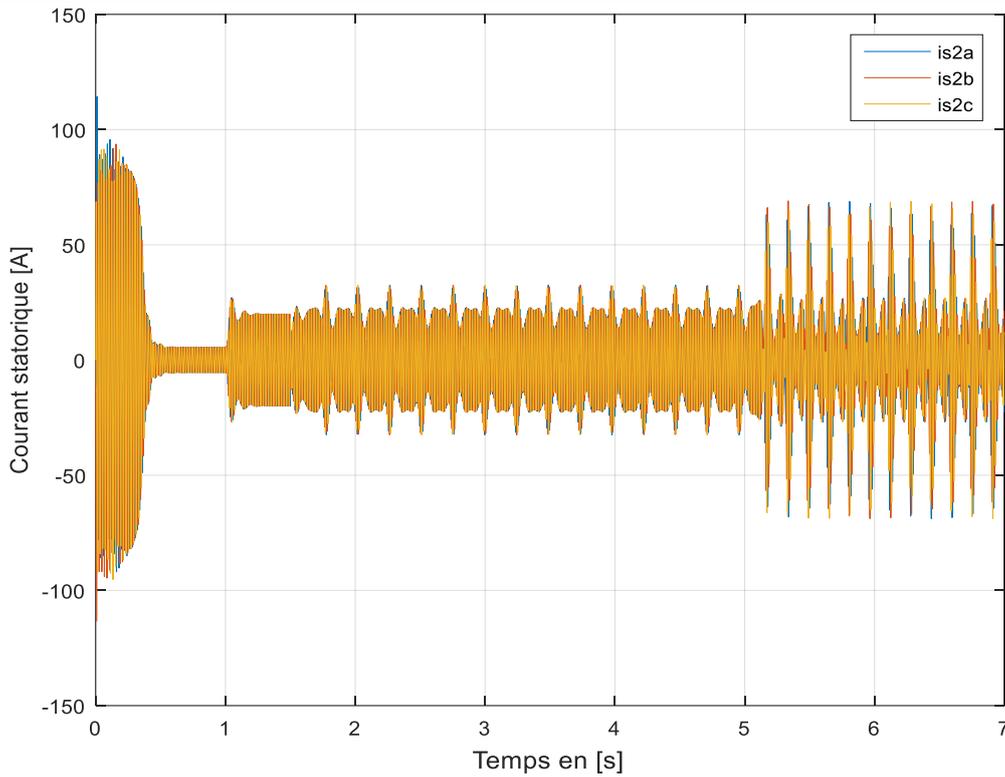


Figure III.9 : Allure des courants statoriques de l'étoile 2 avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié

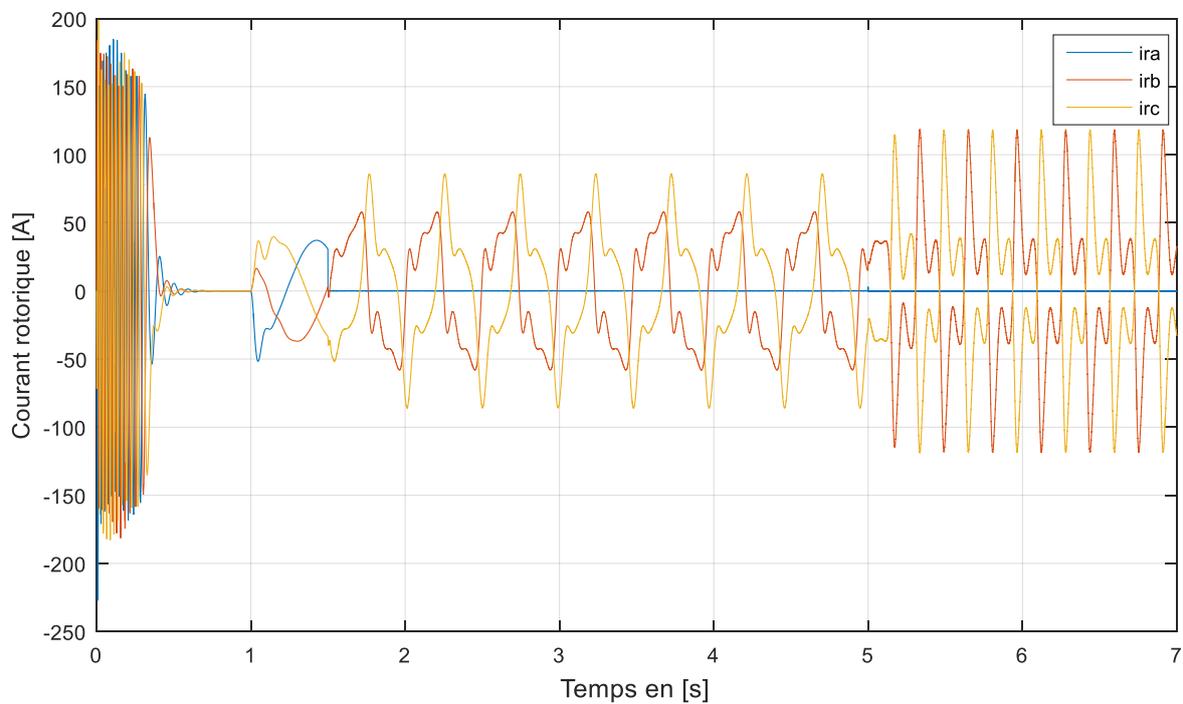


Figure III.10 : Allure des courants rotoriques avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié

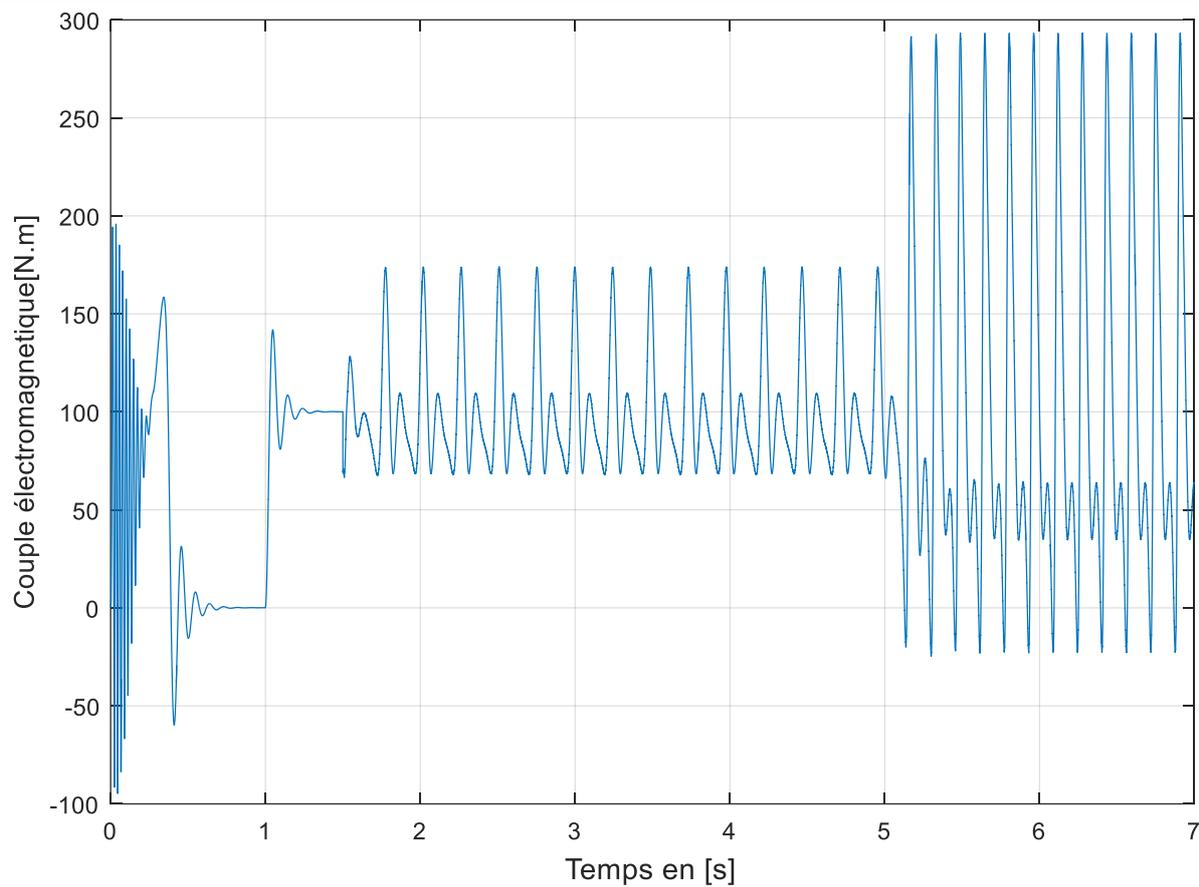


Figure III.11 : Allure du couple électromagnétique avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié

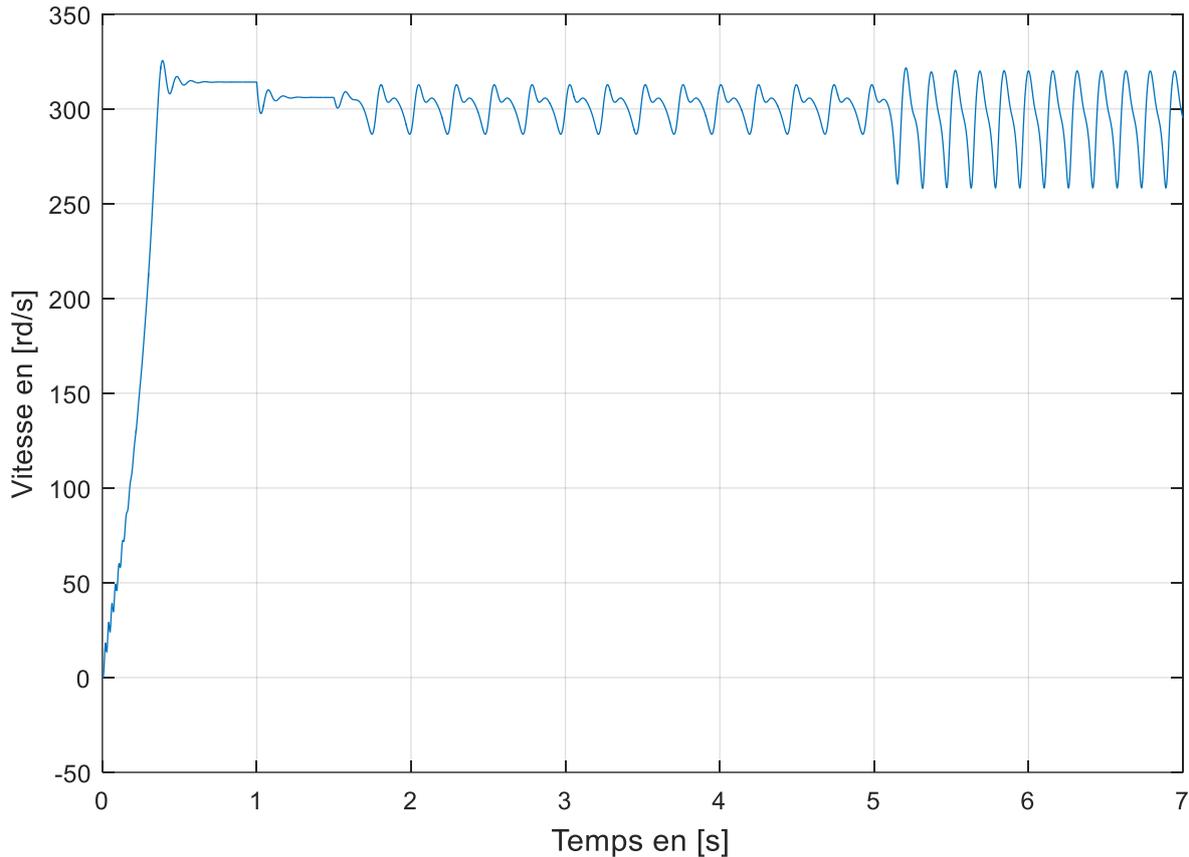


Figure III.12 : Allure de la vitesse avec défaut d'ouverture de la première phase rotorique dans le cas des neutres relié et non relié

III.3.6 Analyse spectrale des résultats obtenues en présence des défauts de l'ouverture de phase statoriques et rotoriques.

1) Cas d'ouverture de la 1^{ère} phase de l'étoile 1 statorique

On a effectué une analyse spectrale pour le courant statorique de l'étoile 1 lors de présence de défaut de l'ouverture d'une phase statorique comme montre la figure (III.13), on observe l'apparition des composantes fréquentielles caractéristiques du défaut à la fréquence $(1 \pm 2g)f$, tel que $g = (N_s - N_r) / N_s$, ces derniers constituant une modulation d'amplitude autour de la fréquence d'alimentation, soit 49.3 et 51.22Hz (Figure III.13).

Pour le spectre du couple sur la figure (III.14), on observe une raie caractéristique du défaut à $2gf = 3.57$ Hz. Même chose pour la vitesse on observe dans la figure (III.15) une composante de fréquence de $2gf = 3.57$ Hz.

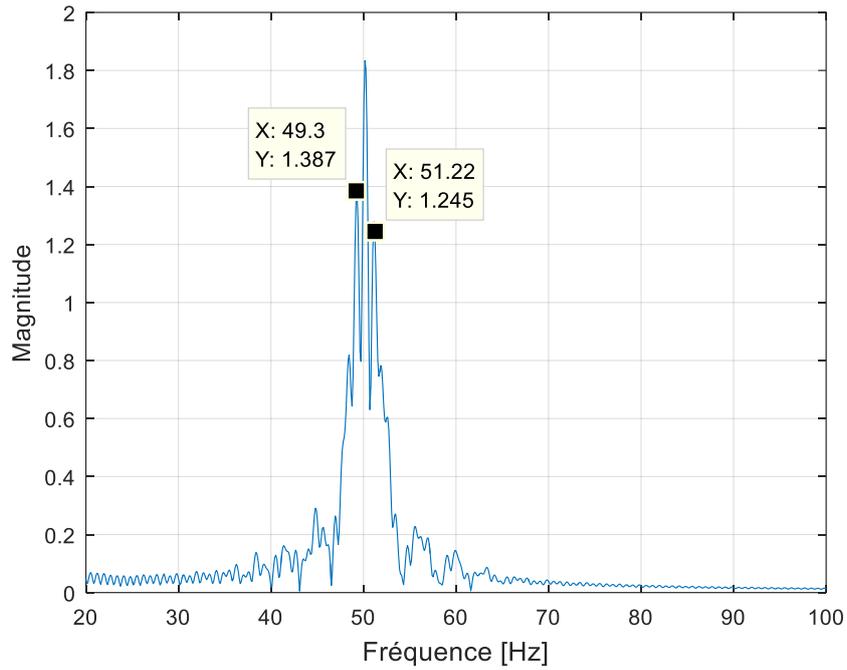


Figure III.13 : Spectre de la première phase de courant statorique (étoile1) dans le cas d'ouverture d'une phase statorique

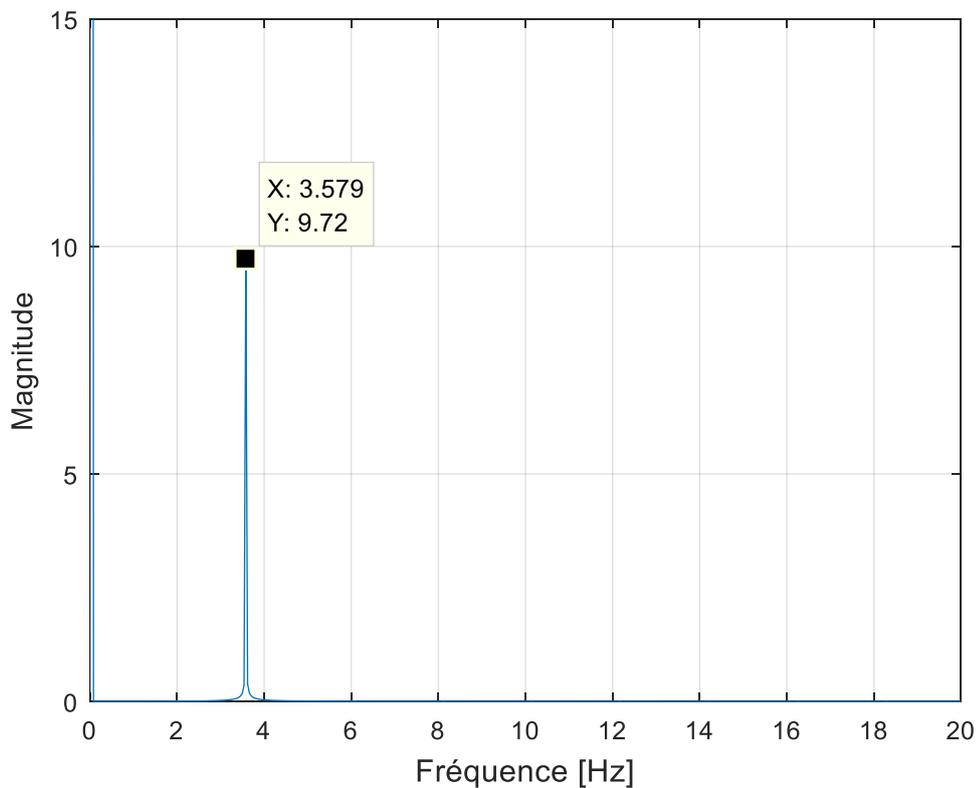


Figure III.14 : Spectre du couple électromagnétique dans le cas d'ouverture d'une phase statorique

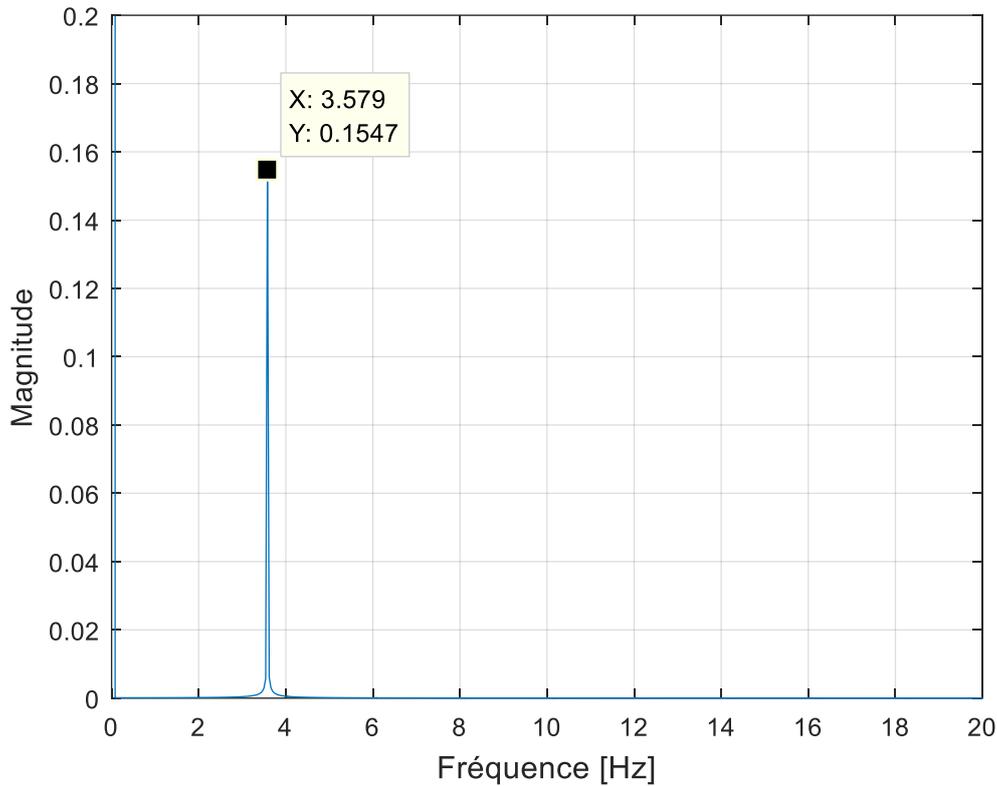


Figure III.15 : Spectre de la vitesse dans le cas d'ouverture d'une phase statorique

2) Cas d'ouverture d'une phase rotorique

On a effectué une analyse spectrale pour le courant statorique de l'étoile1 lors de présence de défaut de l'ouverture d'une phase rotorique, comme montre la figure (III.16), on observe l'apparition des composantes fréquentielles caractéristiques du défaut à la fréquence $(1 \pm 2g)f$, tel que $g = (N_s - N_r) / N_s$, ces derniers constituant une modulation d'amplitude autour de la fréquence d'alimentation, soit 49.23 et 51.03Hz.

Dans le spectre du couple et vitesse comme montre les figures (III.17), (III.18) respectivement, on observe une raie caractéristique du défaut à $2gf \approx 1.362$ Hz, en plus de la composante continue.

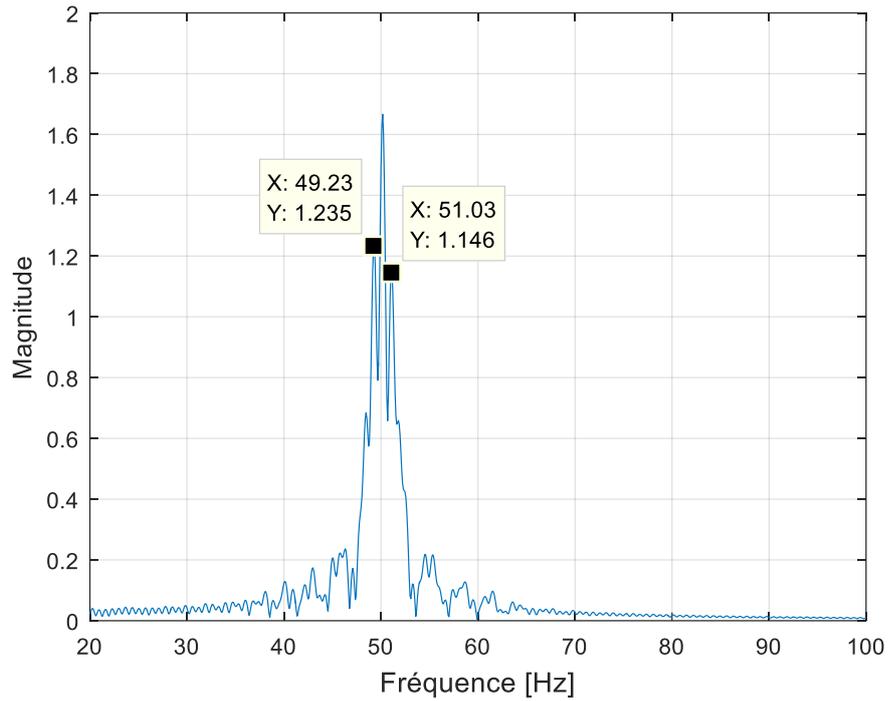


Figure III.16 : Spectre du courant statorique (étoile1) dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique

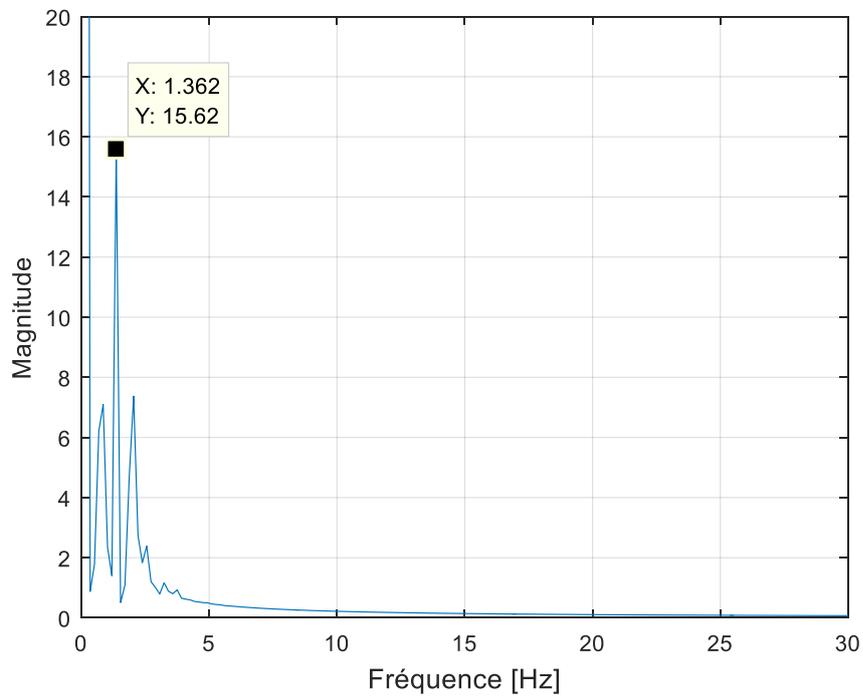


Figure III.17 : Spectre du couple électromagnétique dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique

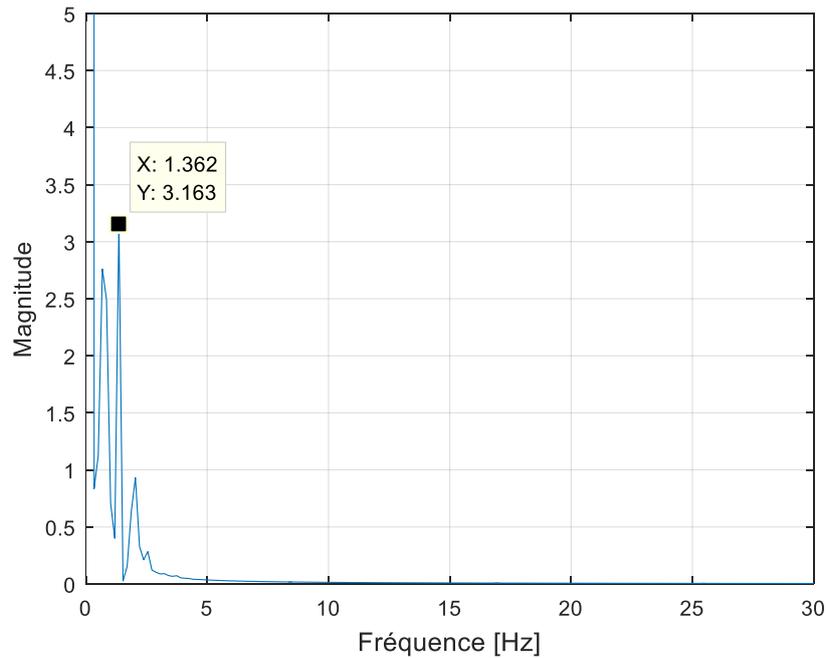


Figure III.18 : Spectre de la vitesse dans le cas d'ouverture d'une phase rotorique

III.4) Modélisation de la MASDE en tenant compte d'un court-circuit entre spires la 1^{ère} phase statorique de l'étoile 1

L'objet de cette partie est de modéliser et simuler la MASDE en présence de défaut de court-circuit entre spires qui indique une dégradation de l'isolant entre deux de l'enroulement de la 1^{ère} phase statorique de la première étoile. La modélisation de défaut est faite à l'aide une résistance connectant deux points de la bobine, sa valeur dépend de la gravité du défaut.

La figure (III.19) présente l'enroulement statorique de l'étoile 1 de la MASDE avec défaut entre spires, les parties $as1$ et $as2$ représentent les parties saine et défectueuse du bobinage de la phase (As), respectivement. Lorsque r_f diminue vers zéro, le défaut entre spires évolue vers un défaut de court-circuit entre spires dans une phase.

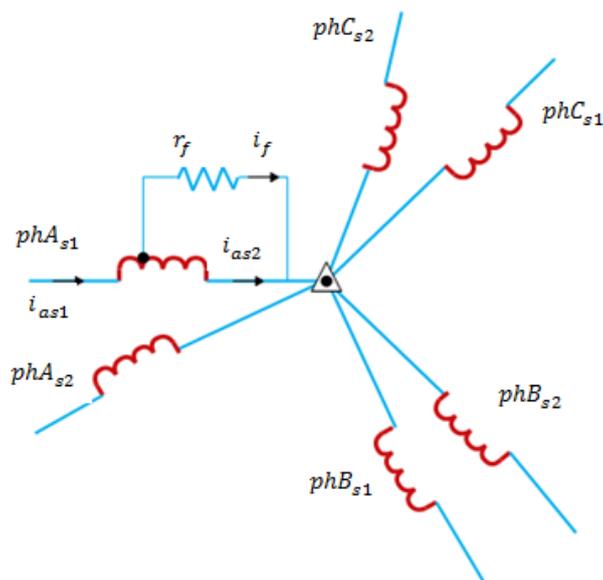


Fig. III.19 : Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la 1^{ère} phase statorique

III.4.1) Hypothèse simplificatrice

Dans le but d'avoir un système simple et convenable à implémenter nous avons pris en considération quelques points :

- Le défaut est survenu au stator sur l'enroulement de la phase (as) de la 1^{ère} étoile;
- La résistance (r_f) représente une résistance de défaut, on prend $r_f = 0$;
- La tension de la phase (as) de la 1^{ère} étoile est supposée égale à la somme des deux tensions v_{as1} et v_{as2} ;
- Le coefficient (μ) représente le nombre de spires en court-circuit par rapport au nombre des spires de l'enroulement de la phase (as) de la 1^{ère} étoile:

$$\mu = \frac{N_{asc}}{N_{as1} + N_{asc}} = \frac{N_{asc}}{N_{as}} \quad (\text{III.17})$$

Où: N_{as} : Nombre de spires par phase; N_{as1} , N_{asc} : Nombres de spires des deux parties de phase en Court-circuit.

III.4.2) Equations électriques

Les équations des tensions de la MASDE dans le repère (abc) sont données comme suit :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } \begin{cases} v_{as1} = r_{as1} i_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = r_{bs1} i_{bs1} + \frac{d\phi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = r_{cs1} i_{cs1} + \frac{d\phi_{cs1}}{dt} \\ v_{asc} = r_{asc} i_{asc} + \frac{d\phi_{asc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.18.a})$$

On introduit le système d'équations (III.18.a) sous forme matricielle suivante :

$$[v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d[\phi_{s1}]}{dt} \quad (\text{III.18.b})$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } \begin{cases} v_{as2} = r_{as2} i_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = r_{bs2} i_{bs2} + \frac{d\phi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = r_{cs2} i_{cs2} + \frac{d\phi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.19.a})$$

On introduit le système d'équations(III.19.a) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d[\phi_{s2}]}{dt} \quad (\text{III.19.b})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ar} = r_{ar} i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = r_{br} i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = r_{cr} i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.20.a})$$

Chapitre III : Modèle de la MASDE en présence des défauts statoriques et rotoriques

On introduit le système d'équations (III.20.a) sous forme matricielle suivante :

$$[v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (\text{III.20.b})$$

Les matrices des résistances statoriques et rotoriques, respectivement sont comme suite :

$$[r_{s1}] = \begin{bmatrix} r_{as1} & 0 & 0 & -r_f \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 \\ -r_f & 0 & 0 & r_{asc} \end{bmatrix}; [r_{s2}] = \begin{bmatrix} r_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s2} \end{bmatrix}; [r_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \ll$$

Avec : $r_{as1} = (1 - \mu) \cdot r_{s1} + r_f$; $r_{asc} = \mu \cdot r_{s1} + r_f$

III.4.3) Equations magnétiques

$$\begin{cases} [\phi_{s1}] = [L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r] \\ [\phi_{s2}] = [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,s1}][i_{s1}] + [M_{s2,r}][i_r] \\ [\phi_r] = [M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r] \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

La matrice des inductances statoriques de la première étoile avec ce type de défaut statorique qui s'écrit :

$$[L_{s1,s1}] = L_{s1} \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu^2 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 & \frac{-(1-\mu)}{2} & \frac{-(1-\mu)}{2} & \mu(1 - \mu) \\ \frac{-(1-\mu)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-\mu}{2} \\ \frac{-(1-\mu)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 & \frac{-\mu}{2} \\ \mu(1 - \mu) & \frac{-\mu}{2} & \frac{-\mu}{2} & \mu^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Et la matrice des inductances statoriques de la 2^{ème} étoile qui s'écrit :

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

La matrice des inductances rotoriques est introduite sous la forme suivante :

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} & \frac{-L_{mr}}{2} \\ \frac{-L_{mr}}{2} & \frac{-L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Les matrices des inductances de couplage entre les deux stators et le rotor et inversement et s'écrivent :

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} (1 - \mu)\cos(\alpha) & (1 - \mu)\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & (1 - \mu)\cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \\ (\mu)\cos(\alpha) & (\mu)\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & (\mu)\cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} (1-\mu)\cos(\theta_r) & (1-\mu)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & (1-\mu)\cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \\ (\mu)\cos(\theta_r) & (\mu)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & (\mu)\cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

En introduisant les expressions des flux (III.21) dans les équations des tensions du stator et du rotor,

on obtient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt}([L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r]) + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt}([M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r]) + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_{r,r}][i_r] + [M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}]) + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

On réécrit le système (III.28) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \frac{d}{dt}([M_{s1,r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \frac{d}{dt}([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \frac{d}{dt}([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Le système d'équation (III.29) devient :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1r}])[i_r] + [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3 \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + [L_{s2,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] + [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3 \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] + [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) + \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] + [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) + [L_{r,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad + r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3 \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Puis on obtient un système d'état qui régit le comportement de la partie électrique de la machine à double étoile représenté comme suite :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}([i_{s1}]) = [L_{s1,s1}]^{-1}([v_{s1}] - [r_{s1}][i_{s1}] - [M_{s1,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s1r}])[i_r] - [M_{s1,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad - r_{ns1}(i_{as1} + i_{bs1} + i_{cs1}) \cdot I_3) \\ \frac{d}{dt}([i_{s2}]) = [L_{s2,s2}]^{-1}([v_{s2}] - [r_{s2}][i_{s2}] - [M_{s2,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{s2,r}])[i_r] - [M_{s2,r}] \frac{d}{dt}([i_r]) \\ \quad - r_{ns2}(i_{as2} + i_{bs2} + i_{cs2}) \cdot I_3) \\ \frac{d}{dt}([i_r]) = [L_{r,r}]^{-1}([v_r] - [r_r][i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s1}])[i_{s1}] - [M_{r,s1}] \frac{d}{dt}([i_{s1}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{r,s2}])[i_{s2}] - [M_{r,s2}] \frac{d}{dt}([i_{s2}]) \\ \quad - r_{Nr}(i_{Ar} + i_{Br} + i_{Cr}) \cdot I_3) \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

III.4.4) Équation mécanique

Les équations fondamentales mécaniques de rotation du rotor sont, comme suite :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - k\Omega_r \quad (III.32)$$

III.4.5) Equation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}^T \left[\frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [M_{s1,s2}] & [M_{s1,r}] \\ [M_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [M_{s2,r}] \\ [M_{r,s1}] & [M_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

D'après les sous matrices des inductances, on trouve que les sous matrices suivantes: $[M_{s1,r}]$ et $[M_{s2,r}]$ dépendent de θ_r ce qui donne une expression du couple électromagnétique plus simple que l'équation :

$$C_{em} = P [i_{s1}]^T \frac{d}{d\theta_r} \{ [M_{s1,r}] [i_r] \} + P [i_{s2}]^T \frac{d}{d\theta_r} \{ [M_{s2,r}] [i_r] \} \quad (III.34)$$

III.5) Simulation et interprétations des résultats de la MASDE en tenant compte d'un court-circuit entre spire dans la phase de la 1^{ère} étoile

Les figures III.20 à III.24 montrent les résultats de simulations de la MASDE en présence de défauts de court-circuit entre spires dans la première phase statorique dans les deux cas de neutre relié (à partir de $t=0$) et non relié (à partir de $t=2s$)

On prend la résistance de défaut égale ($r_f=0$).

Le nombre de spires court-circuitées varie entre 5%, 15% et 25% du nombre total de spires appartenant à la même phase.

A partir des résultats obtenus, on peut observer les changements suivants :

La figure III.20 montre les allures des courants de la première étoile lors de l'application d'un courant court-circuit, nous observons tout d'abord l'influence de ce défaut dans le cas de 5%. Par rapport à son état sain, un 4^{ème} courant apparaît appelé courant de court-circuit (i_{cas}) qui se caractérise par une très grande amplitude (supérieure à 340 A) dans le cas de neutre relié. Pour les phases statoriques, on remarque que deux des phases sont restées relativement de même amplitude tandis que celle de la phase court-circuité a augmenté ($i_{s1a}=22.27$ A, $i_{s1b}=15.5$ A, $i_{s1c}=14$ A).

Dans le cas de neutre non relié la première différence visible à l'œil nue c'est la diminution brusque du courant court-circuit (donc dans le cas de court-circuit il est préférable de ne pas relié le neutre), les trois autres phases sont elles aussi différentes où l'amplitude de la phase court-circuité a augmenté par rapport

Chapitre III : Modèle de la MASDE en présence des défauts statoriques et rotoriques

au cas de neutre non relié, celle de la deuxième phase a diminué alors que la troisième reste relativement pareille.

A l'aide des figures (b) et (c), on constate que les allures ont le même comportement d'une manière générale et on observe l'influence de la variation de μ (15%,25%) qui se manifeste par l'augmentation proportionnelle des amplitudes à celle de sa valeur. On peut aussi noter l'accentuation de la différence entre les amplitudes.

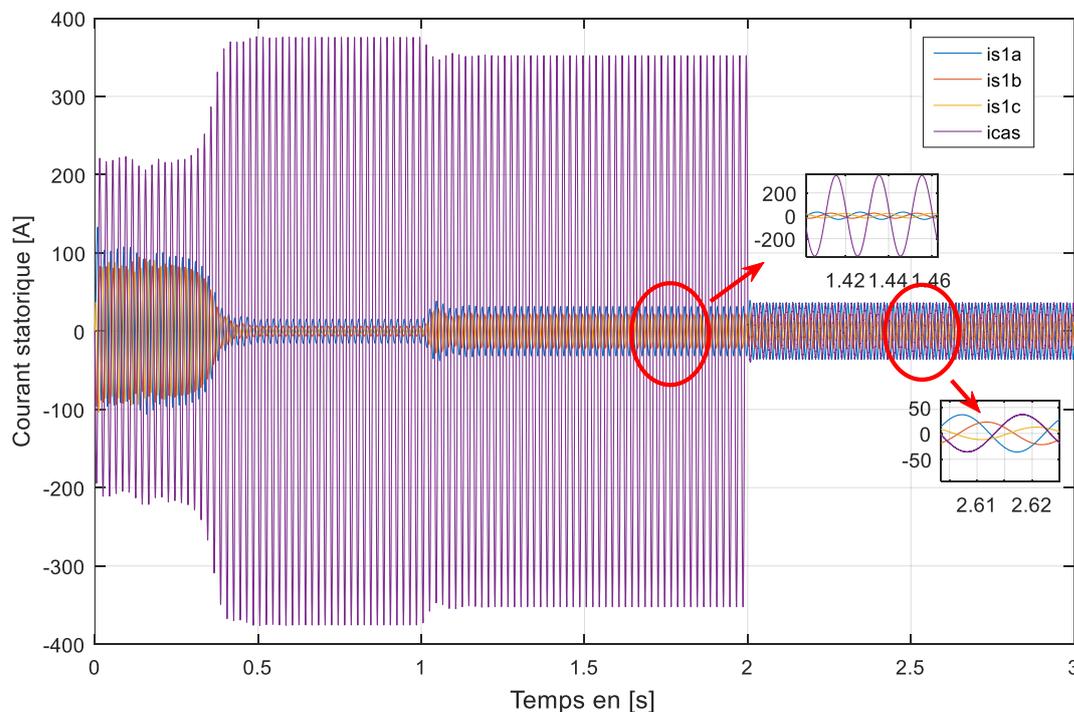
Dans la figure III.21 qui représente les allures des courants statoriques de la deuxième étoile, on note que la seule différence par rapport à l'état sain c'est un léger déséquilibre des phases (i_{s1a} supérieur par rapport aux autres phases).

Dans le cas de neutre non relié, on observe la diminution de l'amplitude de toutes les phases.

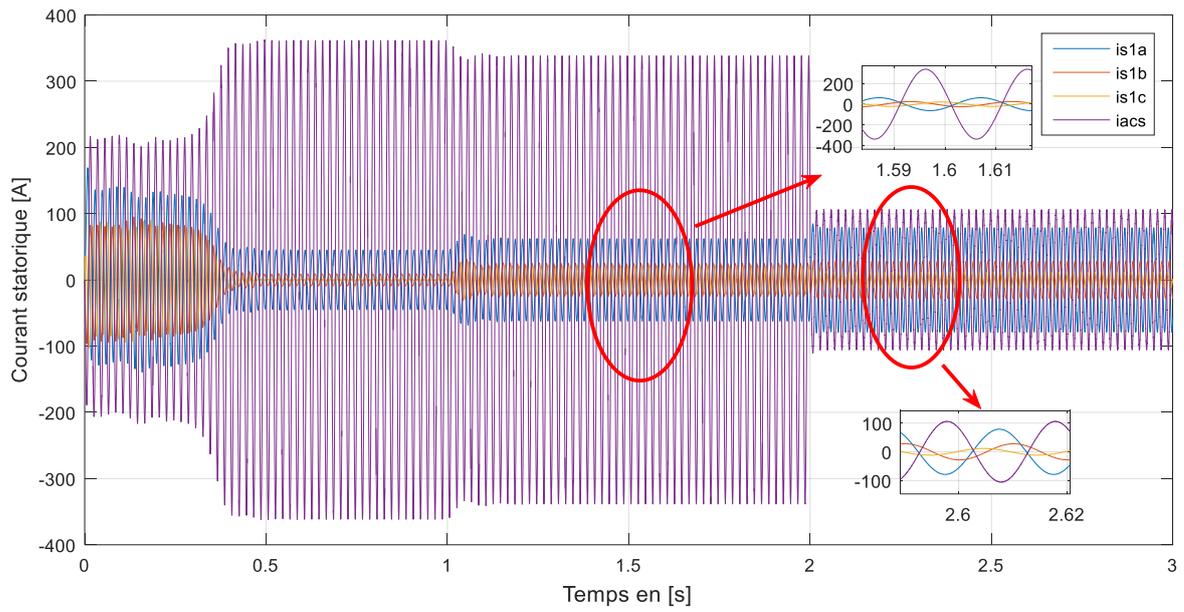
Il est à signaler que μ n'exerce aucune influence notable sur les courants du deuxième stator.

Sur la figure III.22, on peut voir les allures des courants rotoriques, on observe l'apparition d'ondulations, l'amplitude de ces oscillations augmente proportionnellement à μ , mais elle se réduit dans le cas de neutre non relié par rapport à celui de neutre relié.

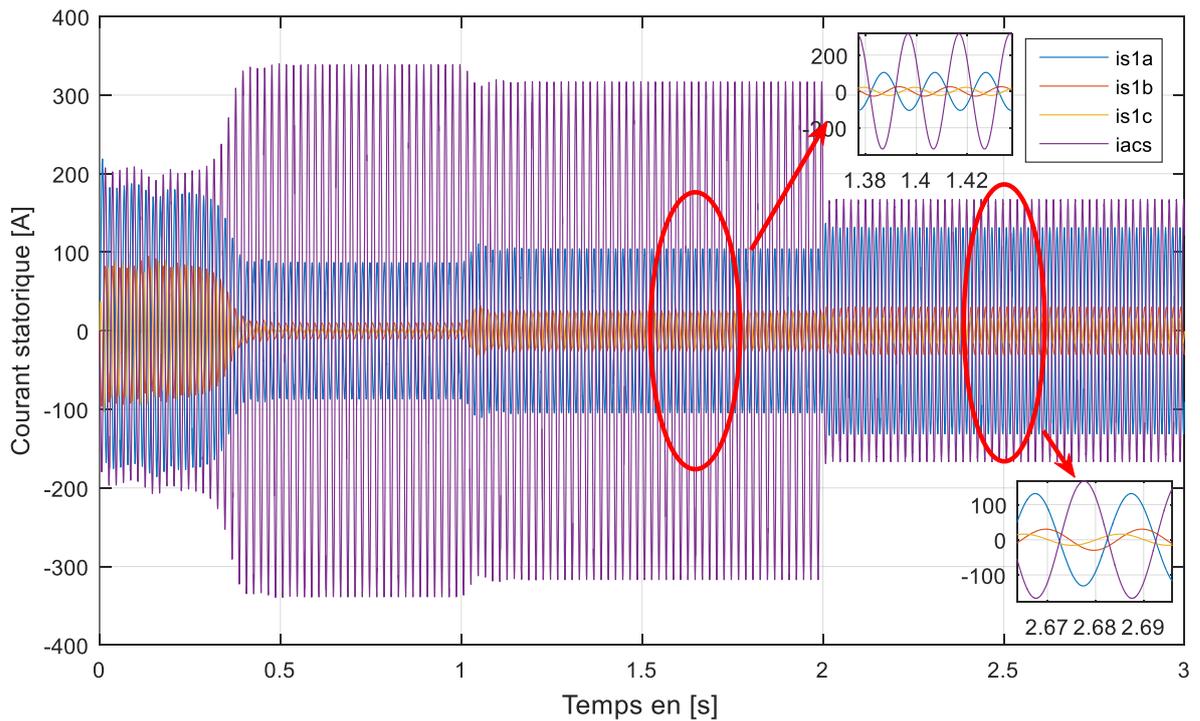
Dans les figures III.23 et III.24 qui montrent respectivement les allures de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique dont la valeur est resté la même par rapport à l'état sain, on observe l'apparition des ondulations de pourcentage de 0.06% et 10% respectivement, ces dernières augmentent d'une façon proportionnelle à μ mais qui diminuent dans le cas de neutre non relié par rapport au cas neutre relié.



(a)

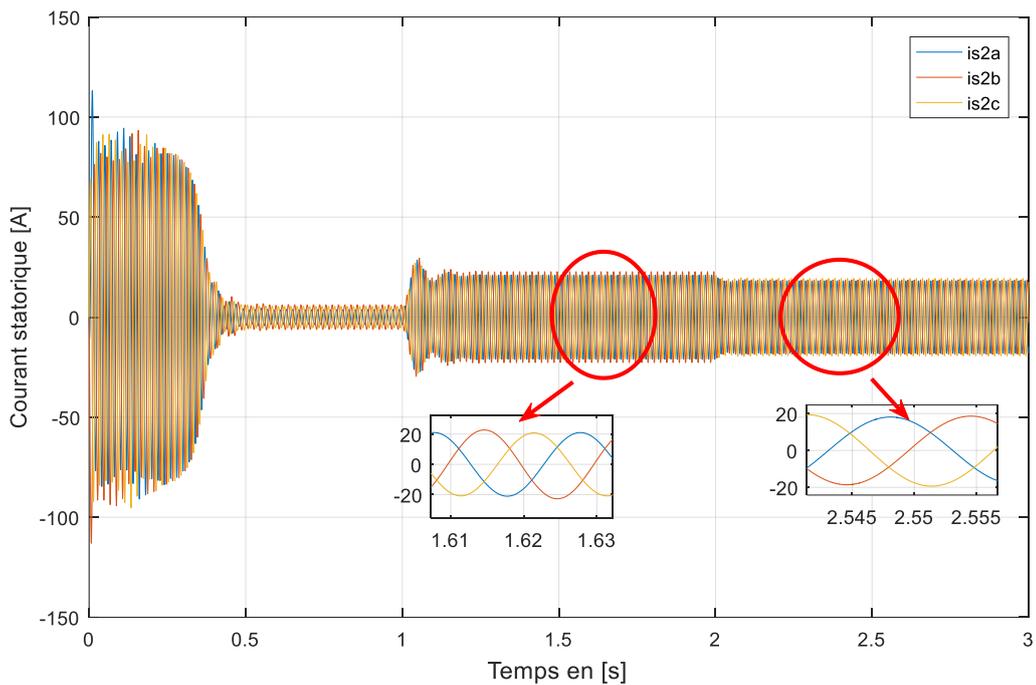


(b)

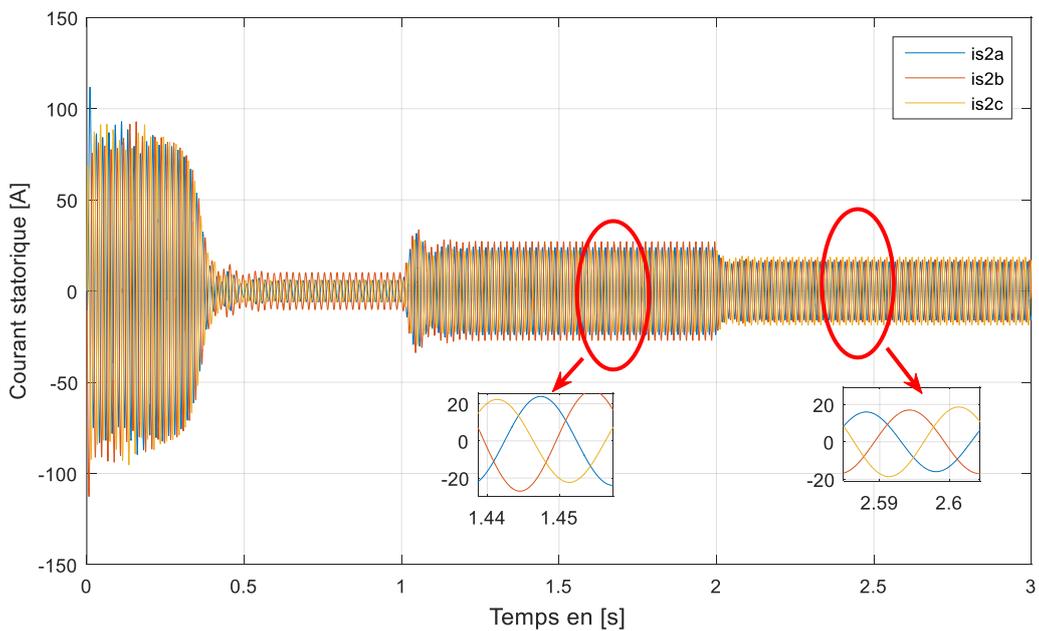


(c)

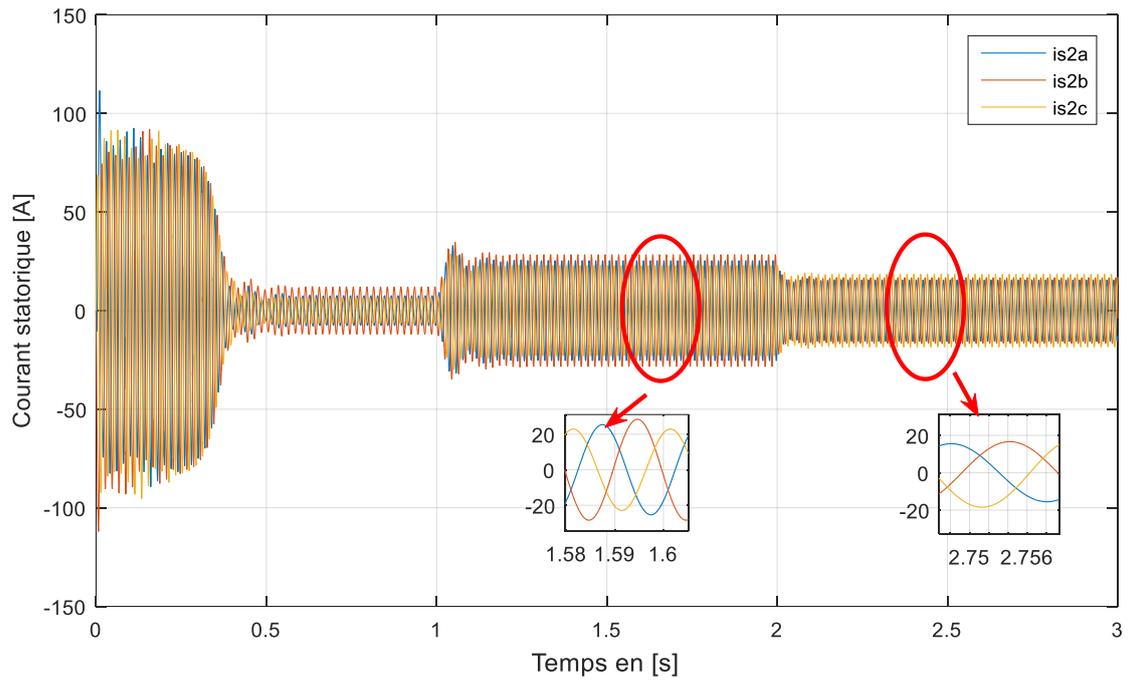
Figure III.20 : Allures des courants statoriques « étoile 1 » en présence de court-circuit en phase A de 5% (a) 15%, (b) et 25% (c) cas neutre relié et non relié



(a)

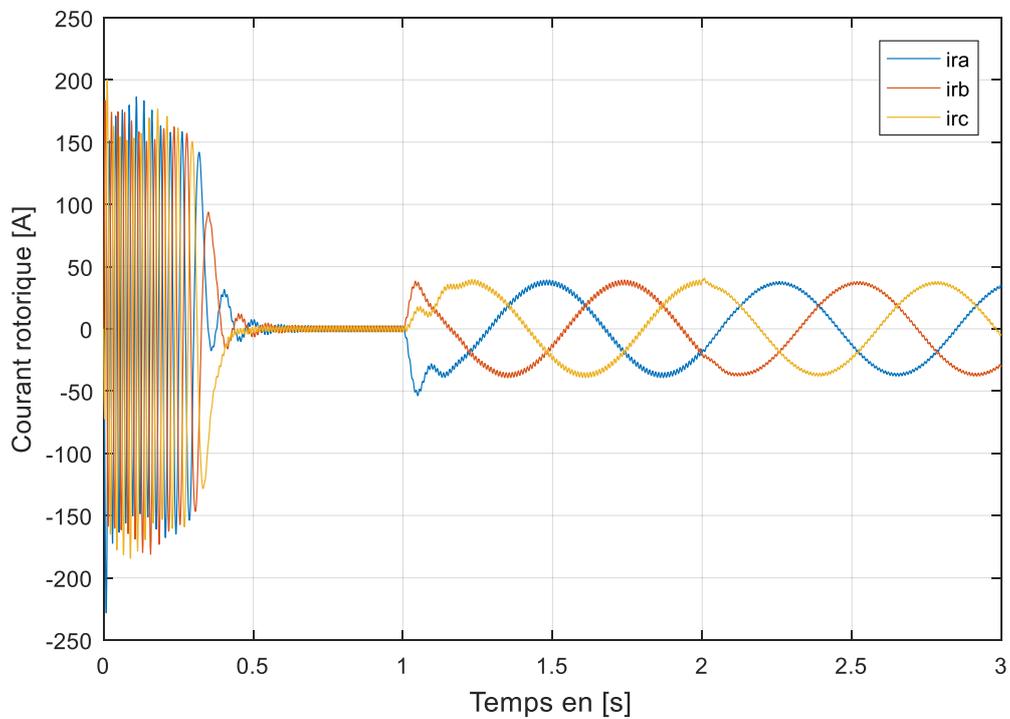


(b)

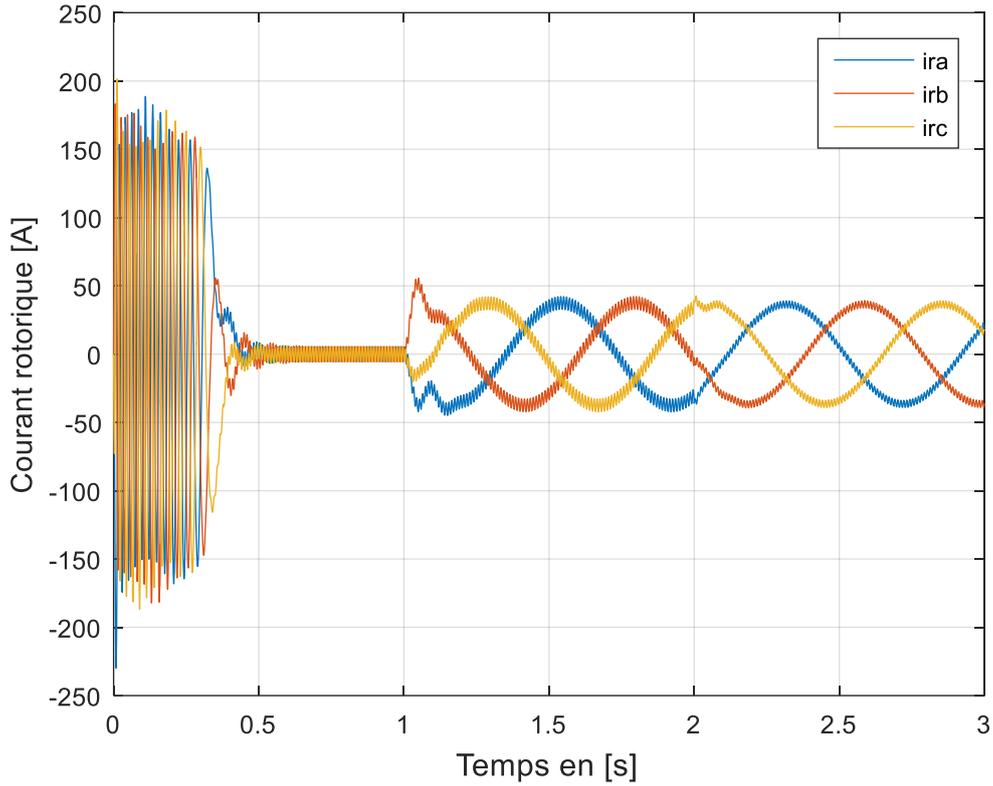


(c)

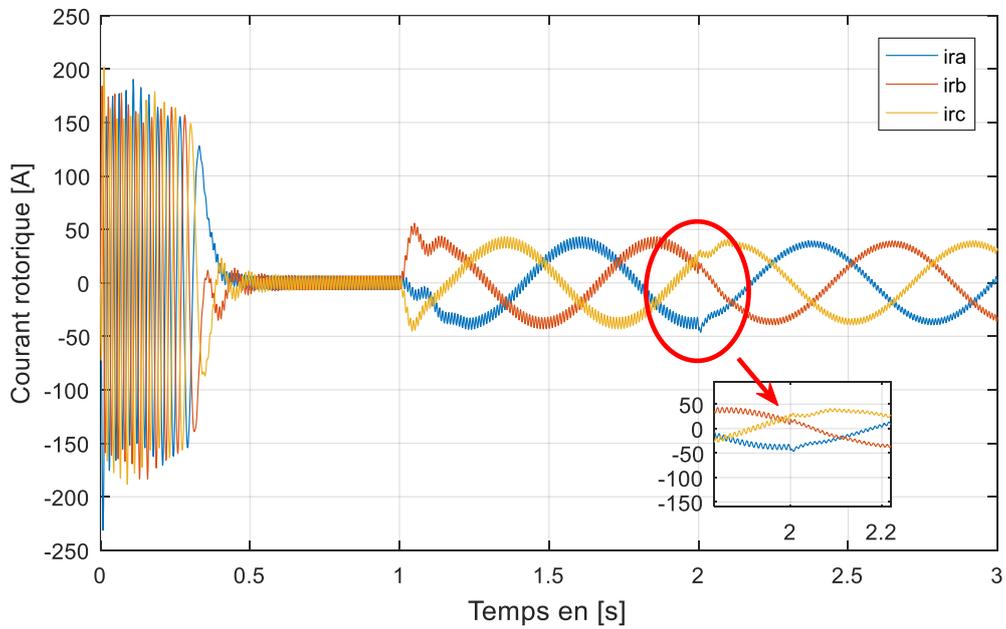
Figure III.21: Allures des courants statoriques « étoile 2 » en présence de court-circuit en phase A de 5% (a) 15%, (b) et 25% (c) cas neutre relié et non relié



(a)

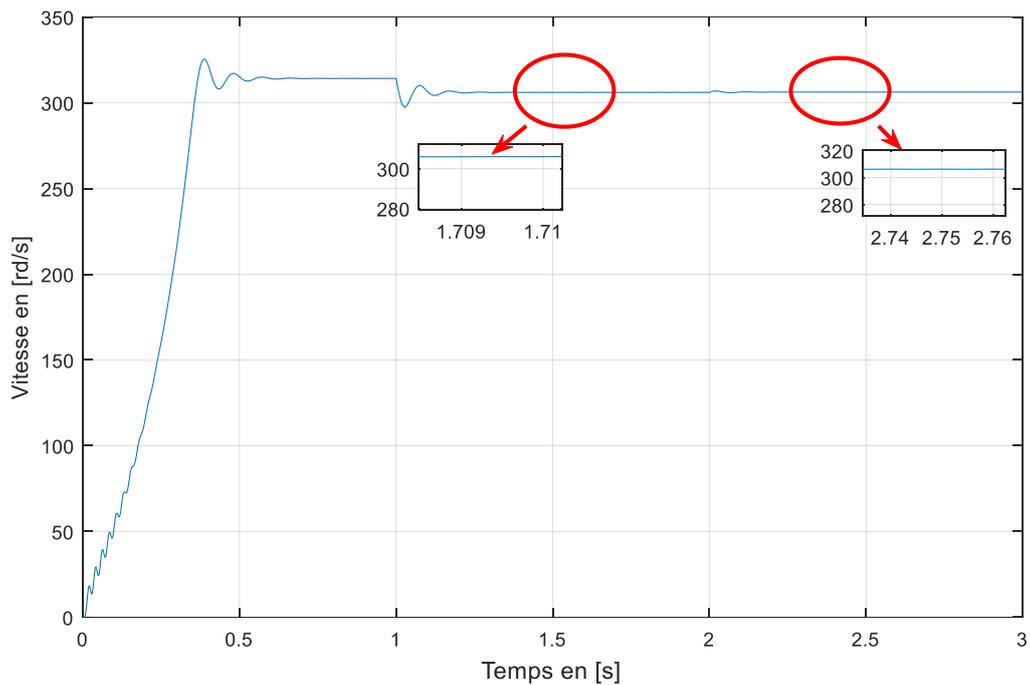


(b)

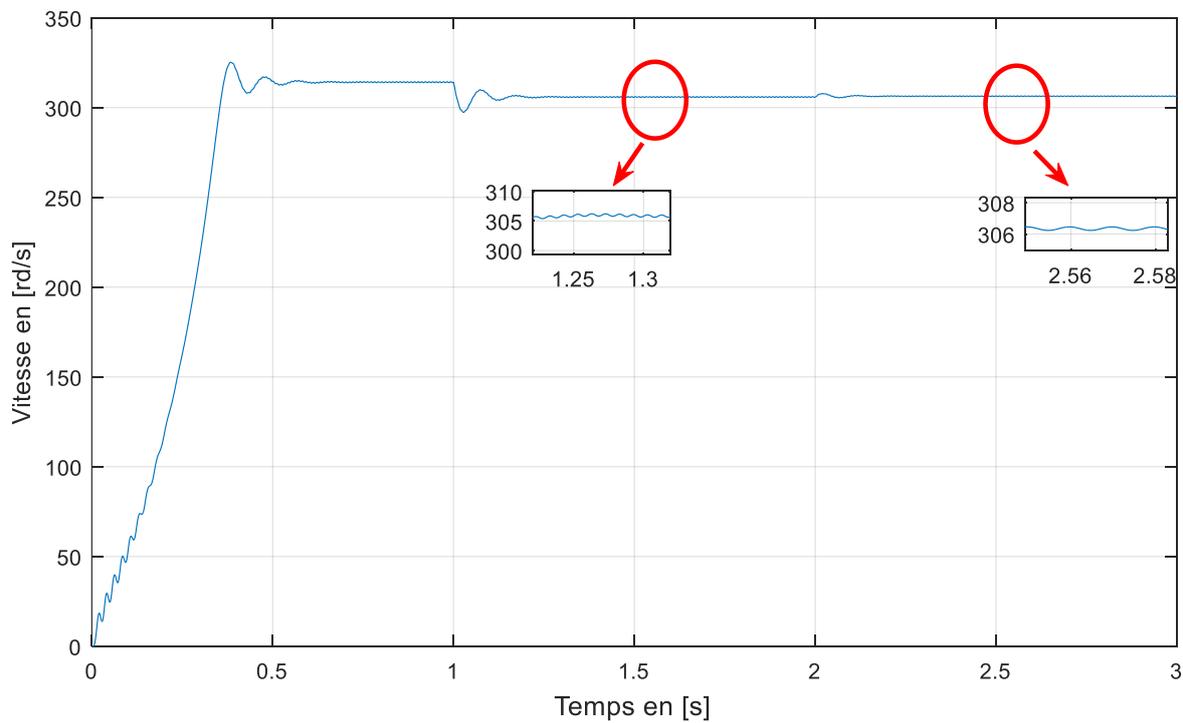


(c)

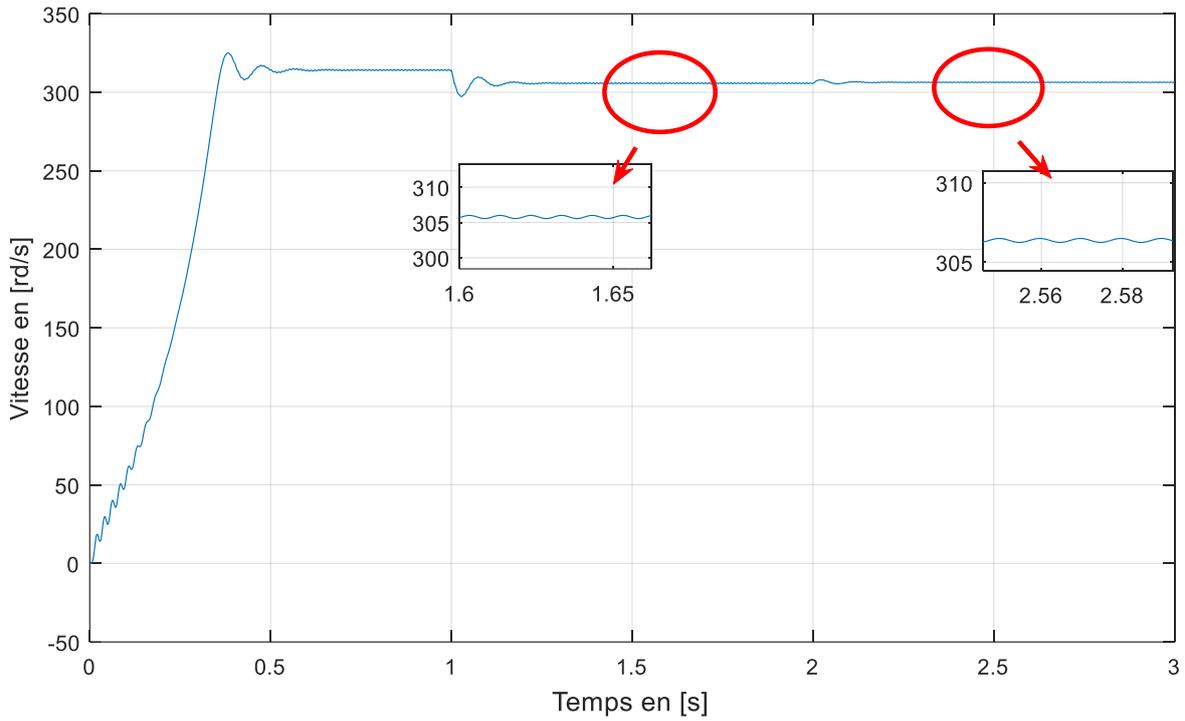
Figure III.22 : Allures des courants rotoriques en présence de court-circuit en phase statorique A de 5%
(a) 15%, (b) et 25% (c) cas neutre relié et non relié



(a)



(b)

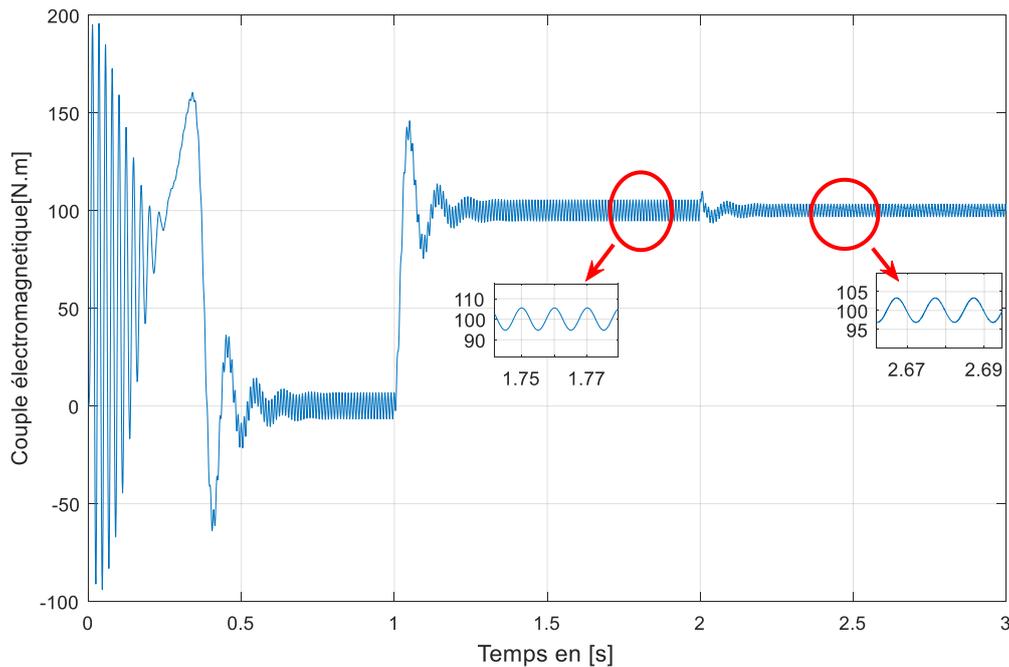


(c)

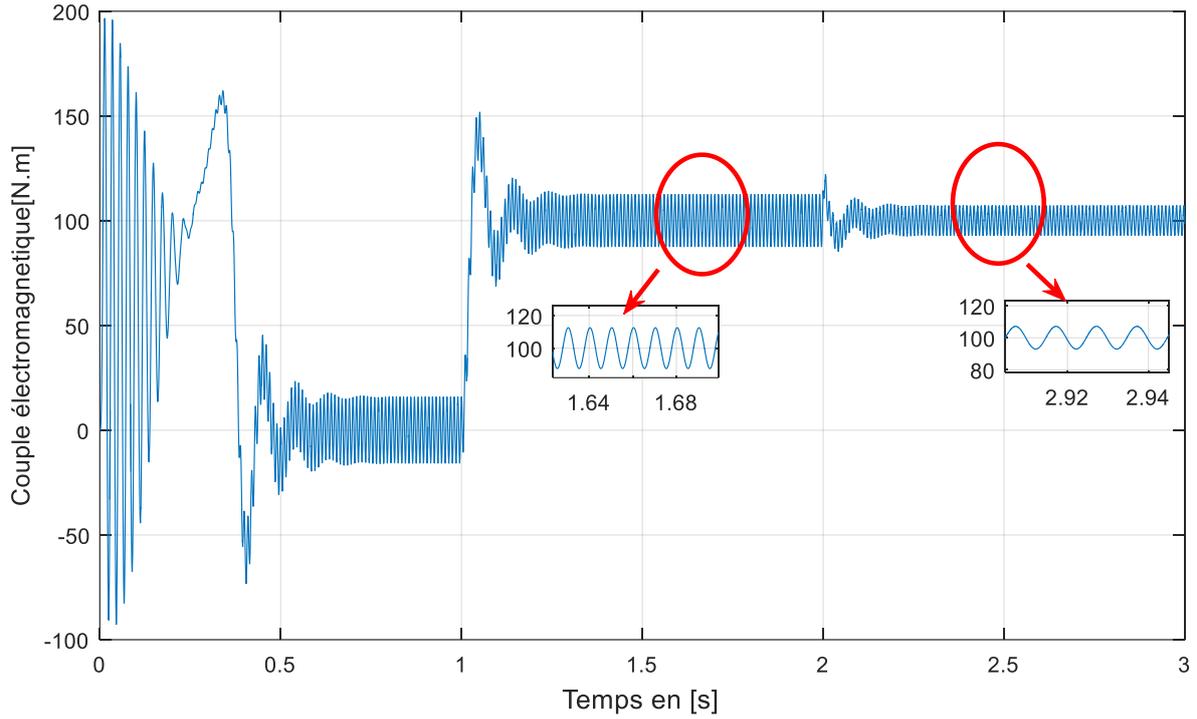
Figure III.23 : Allures des vitesses en présence de court-circuit en phase statorique A de 5% (a) 15%, (b) et 25% (c) cas neutre relié et non relié

Tableau III.2 : Pourcentages d'ondulations de différentes vitesses en présence de court-circuit en phase statorique A

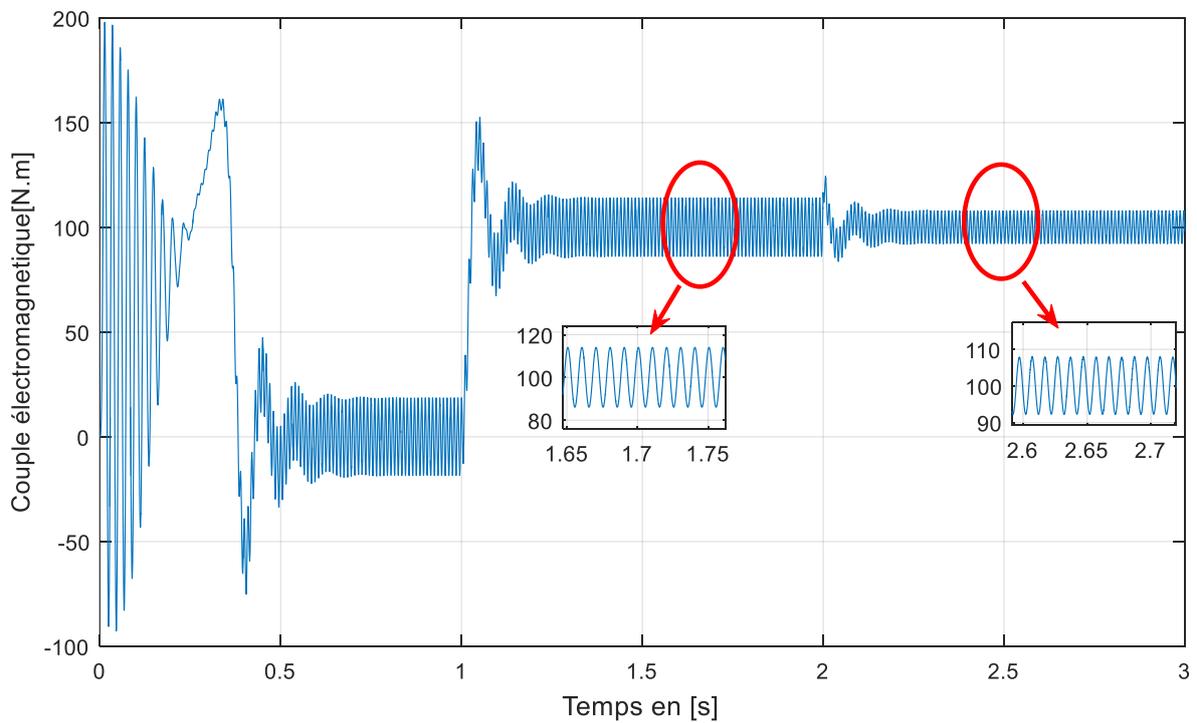
Pourcentages de court-circuit	Pourcentages d'ondulations des vitesses de rotations	
	Cas neutre relié	Cas neutre non relié
5%	0.06%	0.03%
15%	0.1%	0.06%
25%	0.2%	0.1%



(a)



(b)



(c)

Figure III.24 : Allures des couples en présence de court-circuit en phase statorique A de 5% (a) 15%, (b) et 25% (c) cas neutre relié et non relié

Tableau III.3 : Pourcentages d'ondulations des couples en présence de court-circuit en phase statorique A

Pourcentages de court-circuit	Pourcentages d'ondulations des couples électromagnétiques	
	Cas neutre relié	Cas neutre non relié
5%	10%	6%
15%	25%	14%
25%	28%	16%

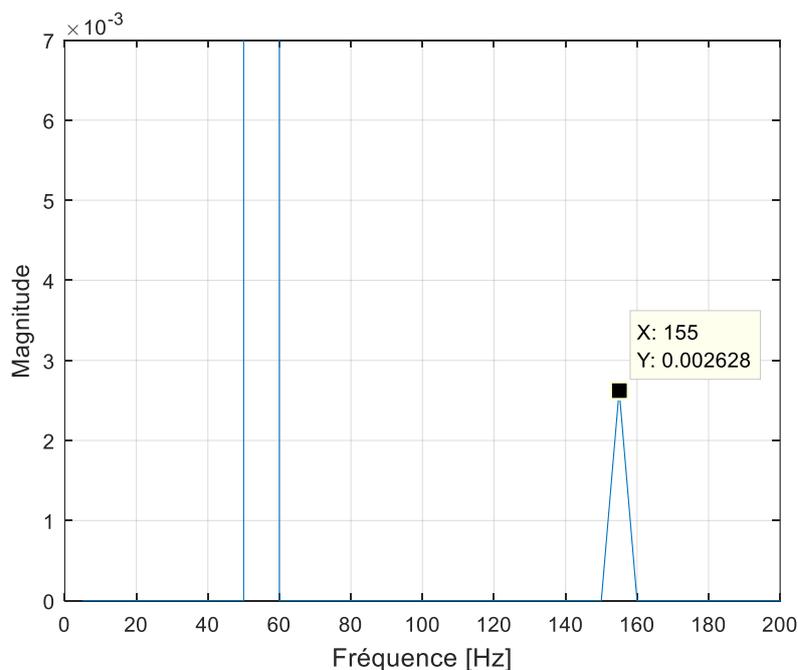
III.4.8 Analyse spectrale des résultats obtenus en présence d'un défaut de court-circuit au stator

On a effectué une analyse spectrale pour le courant statorique lors de présence de défaut de court-circuit entre spire avec des taux de 5%, 15% et 25% comme montre la figure (III.25), on remarque l'apparition d'une nouvelle harmoniques par rapport à l'état sain avec une fréquence de 150 Hz ($f+2f$).

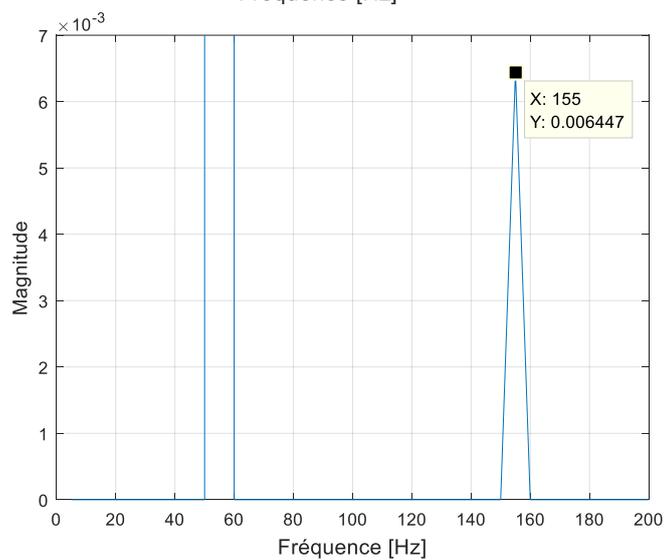
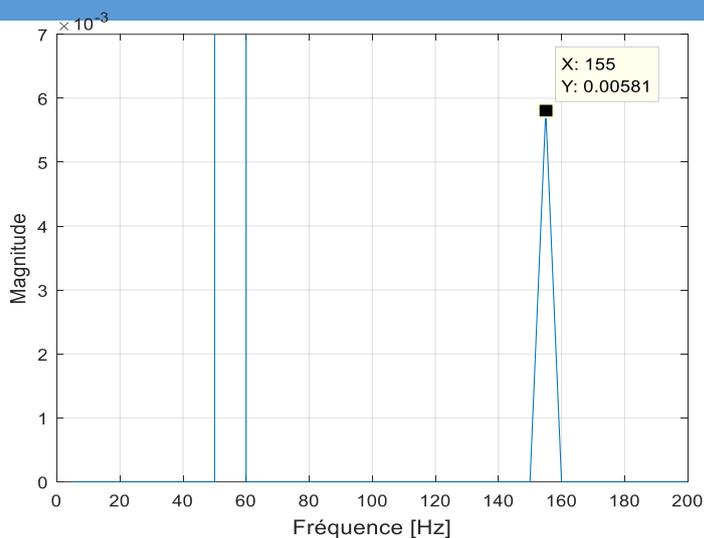
Pour le spectre du couple sur la figure (III.26), on observe une composante de fréquence de 100 Hz ($2f$), l'amplitude de cette composantes augmente avec l'augmentation de taux de court-circuit (5%, 15% et 25%).

Même chose pour la vitesse on observe dans la figure III.27 une composante de fréquence de 100 Hz ($2f$) l'amplitude de cette composante augmente proportionnellement avec l'augmentation de taux de court-circuit (5%, 15% et 25%).

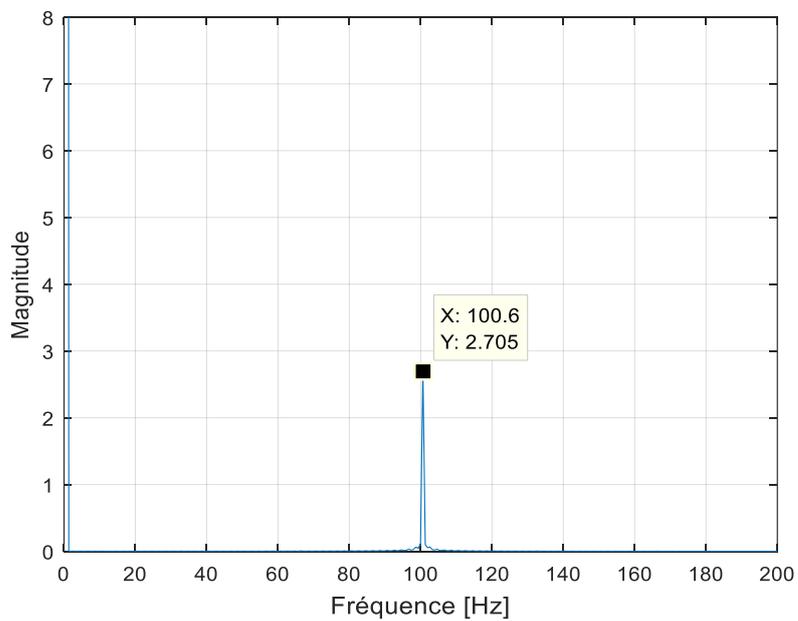
L'analyse spectrale de ces signaux permet de déterminer très efficacement tout défaut statorique survenue dans la machine, où l'amplitude de ces derniers dépend essentiellement de la gravité de défaut.



(a)



(c) **Figure III.25** : Spectres du courant statorique lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique



(a)

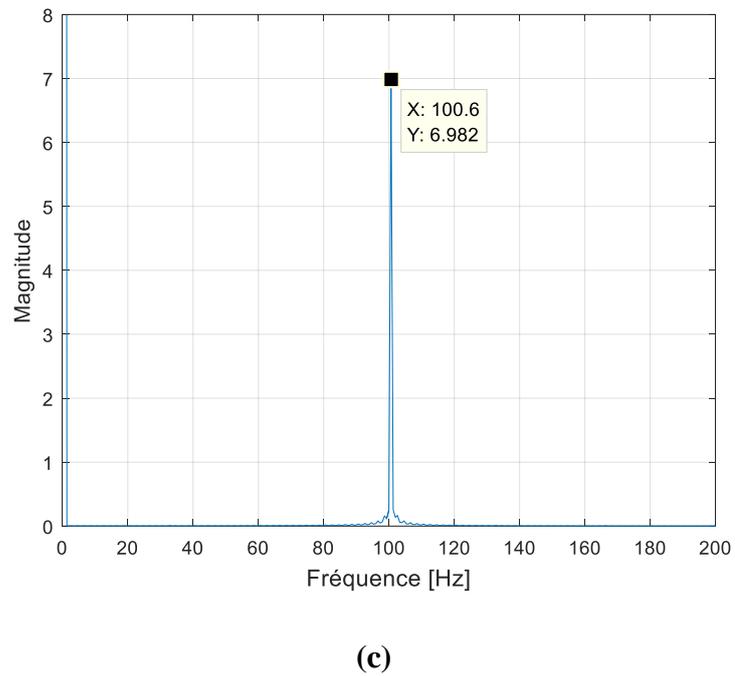
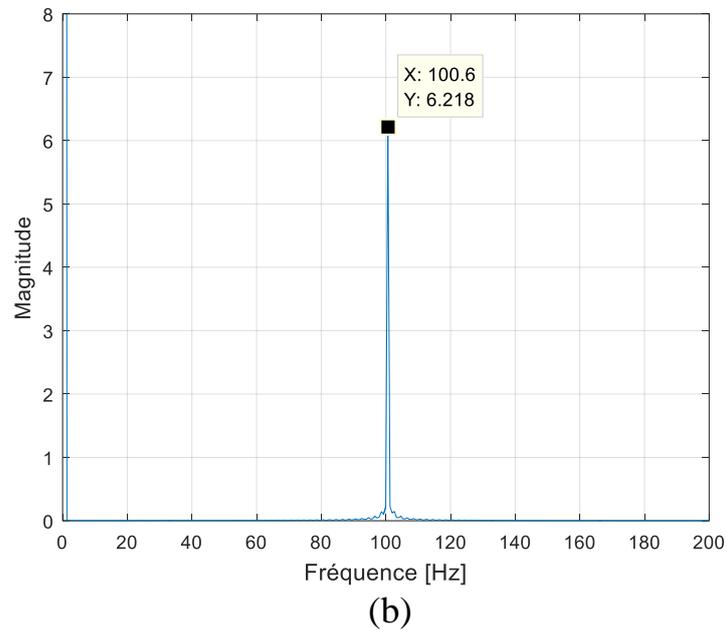
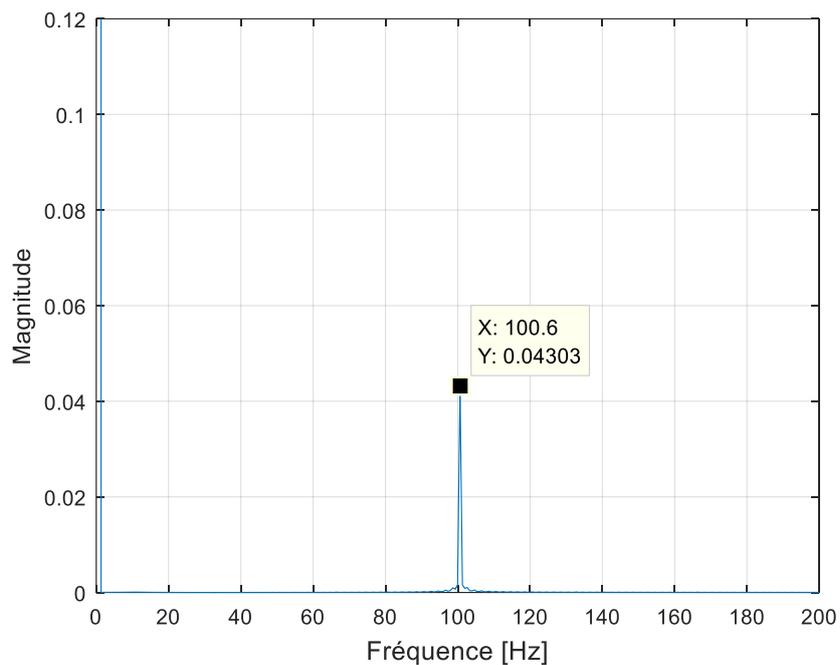
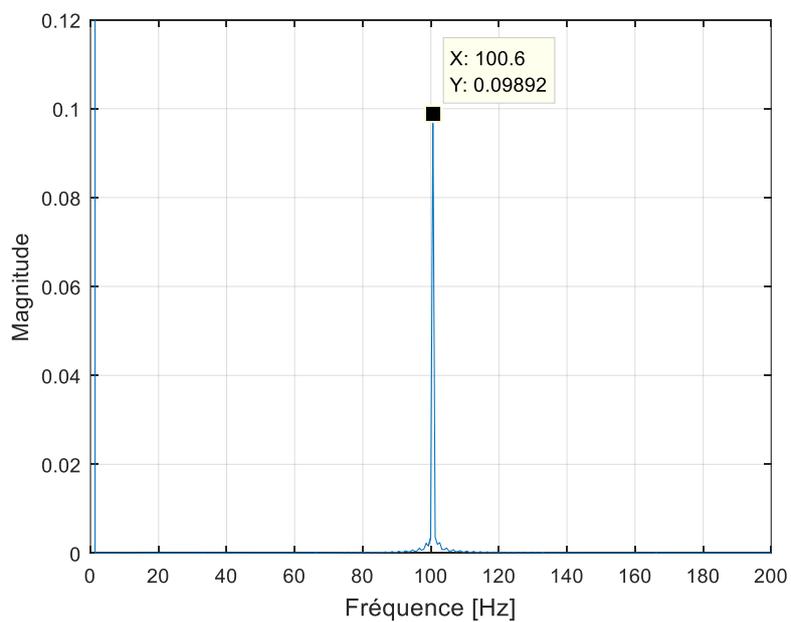


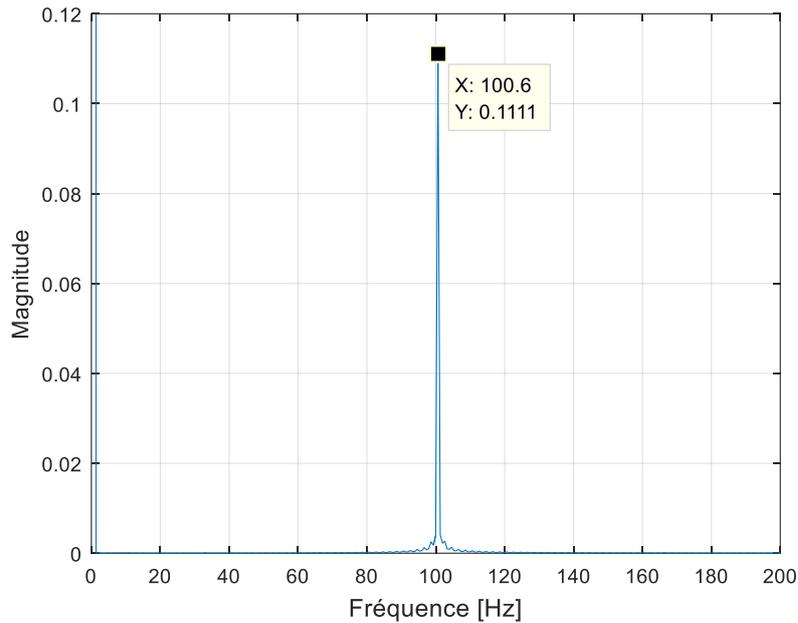
Figure III.26 : Spectres du couple lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique



(a)



(b)



(c)

Figure III.27 : Spectres de la vitesse lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 15% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique

III.5) Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du fonctionnement de la machine asynchrone double étoile en présence de défauts d'ouverture d'une phase (statorique ou rotorique) et défaut de court-circuit d'une phase statorique.

Nous avons étudié l'influence des défauts rotorique et statorique (défauts d'ouverture d'une phase statorique et rotorique et le court-circuit entre spire dans une phase statorique) sur le fonctionnement de la MASDE en augmentant la sévérité des défauts, puis nous avons discuté les résultats obtenus.

Afin de finaliser ce chapitre, nous avons réalisé des analyses spectrales pour mieux comprendre l'influence des défauts sur les grandeurs de la machine asynchrone double étoile.

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes penchés sur l'étude et la modélisation de la machine asynchrone double étoile dans le repère abc en régimes normal et dégradé.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par définir la machine asynchrone en général (ses constituants, son principe de fonctionnement, etc.) ainsi que les défauts dont elle peut être atteinte où nous avons montré les causes de leur apparition ainsi que leur impact sur le fonctionnement de la machine, dans un second lieu, nous avons présenté les méthodes utilisées pour diagnostiquer ces défauts ; nous nous sommes basés sur la méthode de l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de la MASDE. Tout d'abord, nous avons commencé la modélisation de la MASDE dans le repère naturel (abc) puis dans le repère (dqo) ensuite on a simulé les modèles à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink à l'état sain, ceci nous a permis de visualiser les différentes grandeurs de la machine (courants statoriques de la première étoile, courants statoriques de la deuxième étoile, courants rotoriques, couple électromagnétique, vitesse de rotation) après une comparaison entre les deux modèles a été faite et les résultats se sont avérés identiques comme prévu. Pour finaliser le chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation de la machine à l'état sain sous une forme fréquentielle dans le but de les comparer ensuite à ceux du fonctionnement dégradé.

Nous avons finalisé ce mémoire par le troisième chapitre avec la modélisation de la MASDE en présence de défauts. Dans un premier lieu, nous avons modélisé cette dernière en présence de défaut de l'ouverture d'une phase statorique dans les deux cas de neutres relié et non relié, puis on a simulé le modèle à l'aide du logiciel MATLAB ; on a obtenu différentes caractéristiques de la machine que nous avons interprétée.

Notre dernière étape de l'étude était la réalisation d'une analyse spectrale des courants statoriques de la première étoile, vitesse et couple, on a comparé les résultats à celles de l'état sain. On a réalisé une étude similaire dans le deuxième cas qui est en présence de défauts de l'ouverture d'une phase rotorique. Pour terminer ce chapitre, on a modélisé la machine avec un troisième cas qui est la présence du défaut de court-circuit entre spires de la même phase statorique avec des différents pourcentages et ce dans les deux différents cas (neutre relié, neutre non relié). On a réalisé le modèle sous forme de schéma bloc sous l'environnement MATLAB/Simulink puis on l'a simulé, on a comparé les résultats à ceux de l'état sain ; après la simulation une analyse spectrale a été faite et examinée et des observations ont été tirées.

D'après les résultats obtenus ci-dessus, on constate que le défaut de l'ouverture d'une phase rotorique provoque de graves perturbations dans les performances des dispositifs (courants statoriques et rotoriques, couples électromagnétique, vitesse de rotation) et que la présence d'un neutre relié est préférable en présence de défauts d'ouverture de phase statorique ou rotorique et déconseillé dans le cas de défauts de court-circuit,

de plus on a conclu que plus le pourcentage de μ est importants plus les la machine est défailante et s'éloigne de son état de fonctionnement normal.

Enfin grâce à l'analyse spectrale, on a pu à déterminer les harmoniques caractérisant les défauts étudiés.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives de recherches et de réalisation pratique intéressantes pouvant contribuées à mieux exploité la machine sont envisageables, de plus on aurait aimé faire varier la valeur de la résistance de défauts r_f .

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Bernard, "Historique des machines électromagnétiques et particulièrement les machines à réluctance variable," Revue 3E.In°3. pp. 3–8, Juin 1995 ;
- [2] D. Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : Modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy- I, France, décembre 2001;
- [3] K.Iffouzar, Etude et contrôle des machines asynchrones polyphasées en modes normal et dégradé. Application dans un système embarqué, Thèse Doctorat de l'université de Bejaia, Algérie 2016;
- [4] D. Bouamra et N.BEDDI, « Etude d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de Master, l'Université d'El Oeud, 2014;
- [5] B. Moussaoui, Y. Nekomouche, " Modélisation des moteurs asynchrones polyphasées dédiée au diagnostic de court-circuit entre spires, application aux moteurs penta phases et double étoile ", Mémoire d'ingénieur, Université MMTO, Alger, 2008;
- [6] Z. Tir, "Etude d'une machine asynchrone double étoile (modélisation, alimentation et commande)", Mémoire de Master, Université d'El-Oued, 2014;
- [7] H-reza .P. N, Pooya D, Abbas.S «A novel structure for vector control of symmetricalsix-phase Induction machines withthreecurrentsensors» ETASR – Engineer in Technology & Applied Science Research Vol. 1, No. 2, 2011, 23-29;
- [8] G. K. Singh, "Multi-phase induction machine drive research—a survey," Electric Power System Research., pp. 139—47, vol. 61, 2002;
- [9] E. Merabet, « Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile », Thèse de magistère, Université de Batna, 2008;
- [10] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007;
- [11] H. Razik and G. Didier, "On the monitoring of the defects of squirrel cage induction motors," in Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 6 pp. Vol.2;
- [12] G. Salles, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Crellet, and G. Franceschini, "Monitoring of induction motor load by neural network techniques," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, pp. 762-768, 2000;
- [13] A. Lalouche, "Diagnostic des Machines Tournantes, Étude Numérique et Expérimentale", Mémoire Magister vol(154) , 2006;

- [14] F. Jawad « Etude du problème inverse en électromagnétique vue de la localisation de désaimantation dans les actionneurs à aimant permanent » thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de technologie de Belfort. Science pour l'ingénieur 2008 ;
- [15] R. Bouseksou, "Modélisation Analytique des Machines Asynchrone Application au Diagnostic", Mémoire Magister en Université Menturi Constantin, 2007 ;
- [16] O. Ondel [16] O. Ondel, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application à un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en École centrale de Lyon, France, 2006 ;
- [17] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, Mars 1992 ;
- [18] R. Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissances des formes », thèse de doctorat, Université de Lyon, décembre 2003 ;
- [19] G. Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone présence de défaillances » thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, octobre 2004 ;
- [20] A. Abed, « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique, 2002 ;
- [21] F. Babaa « contribution à la modélisation et la commande de machine asynchrone : application au diagnostic des défauts statoriques » thèse de doctorat, université de Constantine, 2014 ;
- [22] A. Ceban, "Méthodologie globale de diagnostic des machines électriques ", thèse de doctorat de l'Université d'Artois, France, 2012;
- [23] R. Merad « Outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone triphasée à cage d'écurieul » Magister en électrotechnique, université de Constantine ,2006 ;
- [24] M. Khov « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique » doctorant de l'université de Toulouse ,17 Décembre 2009 ;
- [25] R. Casimir « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des Formes » doctorant de l'université de Lyon, 2003 ;
- [26] V. Babak « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut Entre-spores Modélisation – Réduction du courant de défaut » doctorant de L'Institut National Polytechnique de Lorraine ; 2009;
- [27] A. Chahmi « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran ,2017;

- [28] B. Vaseghi « Contribution à L'étude des Machines Electriques en présence de défaut entre spires modélisation-réduction du courant de défaut », Thèse de Doctorat d'Université de Lorraine, 2009 ;
- [29] T. Esfahani , S.Wang , V .Sundararajan « Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors », Ieee/Asme Transactions on Mechatronics, Vol. 19, N°3, Pp. 818-826, 2014.

Résumé

Les moteurs asynchrones ont un très large éventail d'applications dans l'industrie et à cause de leur robustesse ainsi que leur puissance massique, et leur coût avantageux, ils sont extrêmement favorisés et utilisés, c'est donc impératif de détecter de manière précoce les défauts qui peuvent apparaître dans ces machines.

Ce travail a pour objectif d'apporter de nouvelles informations qui aideront au développement des méthodes de surveillance, de fonctionnement ou de maintenance préventive.

Nous avons pour cela utilisé une approche virtuelle en réalisant des maquettes sur MATLAB (SIMULINK) à partir du modèle mathématique des MADE.

Mots clé :

Moteur Asynchrone

Double étoile

Défauts diagnostique

Modélisation

.

Abstract

Asynchronous motors have a very wide range of applications in the industry and because of their robustness as well as their mass power, and their advantageous cost, they are extremely favored and used, so it is imperative to detect in an early way the faults that can appear in these machines.

This work aims to bring new information that will help enhancing the methods of monitoring and preventive maintenance strategies.

We have used a virtual approach by making models on MATLAB (SIMULINK) from the mathematical model of the MADE.

Key words:

Asynchronous machines

Doubles star

Diagnosis

Mathematical model

ANNEXE

$V_m=220$: Tension efficace d'alimentation simple et couplage en étoile ;

$p=2$: Nombre de paires de pole ;

$f=50$: Fréquence d'alimentation ;

$l_{s1}=0.0046$: Inductance de fuite statorique d'une phase statorique de la 1ère étoile ;

$l_{s2}=0.0046$: Inductance de fuite statorique d'une phase statorique de la 2ème étoile ;

$L_r=0.0032$: Inductance ramenée au stator ;

$L_m=0.0582$: Inductance mutuelle ;

$J=0.05*(p^2)$: Moment d'inertie ;

$r_{a1}=0.804; r_{b1}=0.8044; r_{c1}=0.804$: Résistances des phases statoriques de la 1ère étoile ;

$r_{a2}=0.804; r_{b2}=0.804; r_{c2}=0.804$: Résistances des phases statoriques de la 2 ;

$r_1=0.196$: Résistances des phases rotoriques ;

$\text{Alpha}=\pi/6$;

$K_F=0.00025*p$: Coefficient de frottements visqueux ;

Couple de charge : $C_r = \begin{cases} 0 \text{ N.m si } t < 1 \text{ s} \\ 100 \text{ N.m si } t \geq 1 \text{ s} \end{cases}$

