

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Abderrahmane mira de Bejaia.

Faculté de Technologie

Département de génie électrique

Projet de fin d'étude

Dans le cadre de :

L'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Option : machines électriques

Thème

***Etude et Simulation de la Machine Asynchrone Double Etoile
dans le repère abc en modes Normal et Dégradé***

Réalisé par :

Mr. ACHAT Nafaa

Encadré par :

**M^{me} S.CHEKKAL
Mr. D. AOUZELLAG**

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu, le tout puissant de m'avoir donné la volonté de mener à terme ce modeste travail qui représente le fruit de plusieurs années d'études.

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans la précieuse collaboration d'un grand nombre de personnes que je tiens à remercier :

Je tiens à exprimer mes remerciements et sincère reconnaissance à ma promotrice : Mme Samira Chekkal et mon Co-promoteur : Djamel Aouzellag d'avoir accepté de parrainer ce travail, ainsi que pour son soutien scientifique et moral.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur Lyes Khaldi, Locif Zadi, Slimane Zaknine qui m'ont aidé à réaliser mon projet de fin d'étude.

Je tiens à témoigner ma gratitude à tous les membres de ma famille pour leur soutien et leurs encouragements ; mes ami(e)s, ceux qui ont contribué à mon aide d'une manière ou d'une autre et dont les noms ont pu être omis.

Enfin, sans oublier je remercie les jurys qui nous feront l'honneur de juger ce modeste travail

Merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes chers parents.
- Ma sœur Fatima.
- Mon grand frère Farid et sa femme Hanane et leur nouvelle née Aylane .
- Mes frères Nordine et Nassim.
- Tous mes proches.
- Tous mes amis :

Sosso, Lolo, Lyes, Sliman, Billal, Joe, Halim, Md Saïd, Md Akli, Nassim, Damiche, Tayeb, Tarik, Massi, Fatma, Rosa Et autres.

- A ma bien aimée.
- A la mémoire de mon oncle Dada Cherif que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

Achat Nafaa

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Chapitre I : Généralités sur les moteurs multiphasés

<i>Introduction général</i>	3
I. Etat de l'art sur les machines triphasées.....	3
I.1 Classification des machines électriques	4
I.1.1 Machines à courant continu	4
I.1.2 Machines synchrones	5
I.1.3 Machines asynchrones.....	6
A. Machines asynchrones à cage d'écureuil	6
B. Machines asynchrones à rotor bobiné	7
I.2 Etat de l'art sur les machines multiphasées	7
I.2.1 Domaine d'applications.....	8
I.2.2 Caractéristiques des machines multiphasées.....	8
A. Machines multiphasées de type (1)	8
B. Machines multiphasées de type (2).....	10
I.2.3 Applications des machines multiphasées	10
I.2.4 Avantages des machines multiphasées.....	12
A. Elimination d'harmoniques d'espace	12
B. Segmentation de puissance	12
C. Amélioration de la fiabilité et le degré de liberté.....	12
D. Augmentation du couple massif	13
I.2.5 Inconvénients des machines multiphasées	13

I.3 Caractéristiques des machines asynchrones double étoile (MASDE) -----	13
I.4 Principe de fonctionnement de la MASDE -----	14
Conclusion -----	15

Chapitre II : Modélisation de la MASDE dans les repères abc et dq0 et son alimentation

Introduction -----	16
II.1 Description de la machine asynchrone double étoile-----	16
II.2 Hypothèses simplificatrices -----	17
II.3 Modèle de la MAS triphasé dans le repère naturel -----	18
II.4 simulation et interprétations des résultats de la MAS triphasé dans le repère naturel -----	21
II.5 Modèle du la MASDE dans le système d'axes $\langle d, q \rangle$ -----	22
II.5.1 Les équations électriques -----	22
II.5.2 Les équations magnétiques -----	23
II.5.3 Expression du couple électromagnétique -----	24
II.5.4 Equation mécanique-----	25
II.6 Modèle biphasé de la MASDE selon le système d'axes $\langle d, q \rangle$ -----	25
II.6.1 Transformation de Park -----	25
II.6.2 Choix du système d'axes-----	26
II.6.2.1 Système d'axes $\langle \alpha, \beta \rangle$ -----	26
II.6.2.2 Système d'axes $\langle x, y \rangle$ -----	26
II.6.2.3 Système d'axes $\langle d, q \rangle$ -----	26
II.7 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes $\langle d, q \rangle$ -----	26
II.7.1 Puissance absorbée et couple 'électromagnétique -----	28
II.7.2 simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes $\langle d, q \rangle$ -----	30
II.8 Modèle de la MASDE dans le repère naturel $\langle abc \rangle$ -----	33

II.8.1 simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le model naturel < abc >	34
II.9 comparaison entre le model d'axe < d, q > et le model naturel < abc > -----	37
Conclusion : -----	38

Chapitre III : Etude par simulation des différents cas de défauts

Introduction : -----	39
III.1 Different défaut dans les machines monophasé -----	39
III.2 Régime dégradé -----	40
III.3 Defaillances dans la machine asynchrone a cage -----	41
III.3.1 Défauts rotoriques -----	40
III.3.1.1 Défaut de barres rotoriques(cassure des barres)-----	40
III.3.2 Défauts statorique -----	41
III.3.2.1 Défaut de court-circuit statorique -----	42
III.4 Modèle de la MASDE avec l'ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques---	42
III.4.1 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le model naturel < abc > en mode dégradé-----	44
III.4.1.1 Ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente -----	44
III.4.1.2 Ouverture de deux phases non adjacentes -----	49
III.4.1.3 Elimination d'une étoile -----	52
III.4.1.4 Court-circuit d'une phase statorique -----	55
Conclusion-----	57
Conclusion général-----	58

Recherche bibliographique

Annexe

Liste des figures

Figure I.1 Moteur à courant continu.....	4
Figure I.2 Moteur à aimants en géométries cylindriques.....	5
Figure I.3 Machine asynchrone à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement.....	6
Figure I.4 Machine asynchrone à rotor bobiné.....	7
Figure I.5 Stratégie de contrôle des systèmes de production d'énergie électrique de la GASDE.....	11
Figure I.6 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.....	11
Figure II.1 Représentation schématique des enroulements de la MASDE.....	17
Figure II.2 Schéma bloc de la machine asynchrone triphasée réalisé sur MATLAB/SIMULINK dans le modèle naturel.	20
Figure II.3 Vitesse de rotation.....	21
Figure II.4 Couple électromagnétique.....	21
Figure II.5 Courants statoriques.....	22
Figure II.6 Courants rotoriques.....	22
Figure II.7 Vitesse de rotation.....	31
Figure II.8 Couple électromagnétique.....	31
Figure II.9 Courants statoriques.....	31
Figure II.10 Zoom des courants statoriques.....	32
Figure II.11 Courants statoriques direct.....	32
Figure II.12 Courants statoriques en quadrature.....	32
Figure II.13 Courants statoriques de la première étoile.....	32
Figure II.14 Courants rotoriques réels.....	33
Figure II.15 Vitesse de rotation.....	35
Figure II.16 Couple électromagnétique.....	36
Figure II.17 Courants statoriques.....	36
Figure II.18 Zoom des courants statoriques.....	36
Figure II.19 Courants statoriques de la première étoile.....	36
Figure II.20 Courants rotoriques.....	37
Figure II.21 Vitesses de rotations des deux modèle (Park et naturel).....	37

Figure II.22 Couple électromagnétique des deux modèles (Park et naturel).....	37
Figure II.23 Courants statoriques des deux model de Park et naturel.	38
Figure II.24 Courants rotoriques deux model de Park et naturel	38
Figure III.1 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.....	41
Figure III.2 Représentation des déférents défauts statoriques possibles.	42
Figure III.3 Exemples des dégâts dus au défaut de court-circuit statorique.	42
Figure III.4 Schéma de simulation de la MASDE dans le repère naturel.	43
Figure III.5 Schéma bloc Simulink des courant statoriques de la première étoile.....	44
Figure III.6 Machine double étoiles lors de l'ouverture des deux phases adjacentes	45
Figure III.7 Couple électromagnétique.....	46
Figure III.8 Vitesse de rotation.....	46
Figure III.9 Courants statorique de la première étoile.....	46
Figure III.10 Courants statoriques de la première phase des deux étoiles.	47
Figure III.11 Courants statoriques de la première étoile.....	47
Figure III.12 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente (aucun défaut).	48
Figure III.13 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase.	48
Figure III.14 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente.	48
Figure III.15 Machine double étoiles lors de l'ouverture des deux phases non adjacentes.	49
Figure III.16 Couple électromagnétique.....	50
Figure III.17 Vitesse de rotation	50
Figure III.18 Courants statorique de la première étoile.....	50
Figure III.19 Courants statoriques de la première phase des deux étoiles	51
Figure III.20 Courants rotoriques.....	51
Figure III.21 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture de deux phases non adjacentes.	51
Figure III.22 Machine double étoiles lors d'élimination d'une étoile.	52
Figure III.23 Couple électromagnétique	53

Figure III.24 Vitesse de rotation.....	53
Figure III.25 Courants statorique de la première étoile.....	53
Figure III.26 Courants statorique de la première phase des deux étoiles	54
Figure III.27 Courants rotoriques.	54
Figure III.28 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors d'élimination d'une étoile.....	54
Figure III.29 Machine double étoiles lors d'un court-circuit d'une phase statorique.....	55
Figure III.30 Couple électromagnétique.	55
Fig.III.31 Vitesse de rotation.....	56
Figure III.32 Courants statoriques de la première étoile.....	56
Figure III.33 Courants rotoriques	56
Figure III.34 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de court-circuit d'une phase.	57

Liste des tableaux

Tableau I.1 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasées de type 1)	9
Tableau I.2 Machines muliphasees dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasees de type 2)	10

V_s : Tension statorique

V_r : tension rotorique

Ψ_s : Flux statoriques

Ψ_r : Flux rotoriques

I_s : courants statoriques

I_r : courants rotoriques

M_{sr} : La mutuel entre le stator et le rotor

M_{rs} : la mutuel transposée entre le stator et le rotor

L_s : Inductance propre statorique

L_r : Inductance propre rotorique

L_{fs} : Inductance de fuite statorique

L_{fr} : Inductance de fuite rotorique

L_1 : Matrice d'inductance de fuites statoriques

L_2 : Matrice d'inductances de fuites rotoriques

L_m : Matrice d'inductances mutuelles

$[e]$: Matrice des f.e.m générées

V_{s1} : Tension statorique de l'étoile 1

V_{s2} : Tension statorique de l'étoile 2

$V_{a,b,c1}$: Tensions statoriques des trois phases de l'étoile 1

$V_{a,b,c2}$: Tensions statoriques des trois phases de l'étoile 2

$\Psi_{a,b,cs1}$: Flux statoriques des trois phases de l'étoile 1

$\Psi_{a,b,cs2}$: Flux statoriques des trois phases de l'étoile 2

$[R_{s1}]$: Diagonale des résistances des trois phases statoriques de l'étoile 1

$[R_{s2}]$: Diagonale des résistances des trois phases statoriques de l'étoile 2

$R_{a,b,cs1}$: Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 1

$R_{a,b,cs2}$: Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 2

I_{s1} : Courants statoriques de l'étoile 1

I_{s2} : Courants statoriques de l'étoile 2

$I_{a,b,cs1}$: Courants des trois phases statoriques de l'étoile 1

$I_{a,b,cs2}$: Courants des trois phases statoriques de l'étoile 2

$[L_{11}]$: Matrices d'inductances propre statorique de l'étoile 1

$[L_{22}]$: Matrices d'inductances propre statorique de l'étoile 2

$[L_{rr}]$: Matrices d'inductances propre rotorique

$[L_{12}]$: Matrices d'inductances mutuelle entre les deux étoiles

$[L_{1r}]$: Matrices d'inductances mutuelle entre l'étoile 1 et le rotor

$[L_{2r}]$: Matrices d'inductances mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor

L_{f1} : Inductance de fuite statorique de l'étoile 1

L_{f2} : Inductance de fuite statorique de l'étoile 2

L_r : Inductance de fuite rotorique

L_{ms} : inductance mutuel

L_{sr} : Inductance mutuel entre le stator et le rotor

L_m : Inductance cyclique

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant

Ω : Vitesse de rotation angle mécanique

P : Nombres de pair de pôles

$[A_{ps1}]$: Matrice de Park pour l'étoile 1

$[A_{ps2}]$: Matrice de Park pour l'étoile 2

$[A_{pr}]$: Matrice de Park pour le rotor

I_{dr} : Courant directe rotorique

I_{qr} : Courant en quadrature rotorique

I_{ds} : Courant directe statorique

I_{qs} : Courant en quadrature statorique

ω_{coor} : Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé

ω_{gl} : Pulsation électrique fondamentale du glissement

ω_r : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotoriques

θ : Position de l'axe u par rapport à l'étoile 1

θ_{gl} : Position de l'axe u par rapport au rotor

θ_r : Position du rotor par rapport à l'étoile 1

η : Rendement

K : Coefficient de couplage magnétique stator-rotor

$\theta_r - \alpha$: Position du rotor par rapport à l'étoile 2

θ_s : Angle électrique relatif aux grandeurs électriques statoriques et aussi du réseau

MAS : Machine asynchrone

MASDE : Machine asynchrone double étoile

Introduction générale

En raison de leur fiabilité, leur simple technique de construction et de commande, leur robustesse mécanique et leur faible coût d'achat, les machines asynchrones triphasées sont largement répandues dans l'industrie. Elles sont utilisées dans la majorité des chaînes de production et les secteurs de pointes tels que l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,

Cependant, dans de grandes variétés des applications industrielles, la croissance de la consommation d'énergie électrique et les applications électriques de forte puissance telles que l'aviation, la traction ferroviaire, pétrochimique et dans la marine ont posé des problèmes au niveau de l'ensemble convertisseur-machine en mode normal ou dégradé, ce qui exige l'emploi de composants de forts calibres. D'un autre côté, le bobinage des machines doit être dimensionné de façon à supporter une tension élevée. Afin de répondre aux exigences déjà mentionnées, la segmentation de la puissance constitue une solution appropriée tout en utilisant des machines asynchrones multiphasées (dont le nombre de phases est supérieur à trois) [IFF16]. En plus de cet avantage, les machines multiphasées présentent plusieurs autres avantages tels que la segmentation de puissance sans augmenter les courants par phase et la minimisation des pertes fer. Un des exemples le plus courant de machine multiphasées est la machine asynchrone double étoile (MASDE).

Dans ce contexte le mémoire comporte trois chapitres principaux :

Le premier chapitre fait l'objet d'un aperçu sur les machines électrique d'une manière générale, puis suivi d'un état de l'art sur les machines multiphasées, basées sur leurs applications dans les différents domaines, à la fin des avantages et des inconvénients de la machine asynchrone double étoile (MASDE) a été présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la MASDE, après une description de la machine, nous élaborons un modèle de la MAS triphasé dans le repère naturel (abc), ensuite nous développons un modèle triphasé de la MASDE, puis le modèle biphasé basé sur la transformation de Park. Nous présentons ensuite un modèle de la MASDE en repère naturel (abc).

Nous allons dédier le troisième chapitre à l'étude et la modélisation de la machine en présence de défauts. L'étude concernera des défauts de type court-circuit de spires dans les enroulements statoriques et l'ouverture d'une ou de plusieurs phases statoriques. Cette étude sera menée par simulation numérique.

Nous terminons par une conclusion générale sur les différents points discutés dans ce mémoire et l'exposition de quelques perspectives de recherche.

Introduction

Dans le domaine de la vitesse variable, l'utilisation de la machine asynchrone est due à ses multiples avantages tels que sa robustesse, la simplicité de sa structure, son poids, sa taille mais surtout son peu de maintenance et son faible coût et permet de répondre à des cahiers de charges très exigeants en termes de performances. En raison de la fiabilité et segmentation de puissance, les machines multiphasées sont de plus en plus utilisées dans les applications électriques de forte puissance et les domaines exigeant une excellente continuité de service. Toutefois, la multiplication du nombre de phases ne met pas la machine à l'abri, elle reste sujette à de nombreux défauts (électriques et/ou mécaniques) ce qui engendre des pertes financières et des arrêts de la chaîne de production.

L'une des machines multiphasées les plus courantes est la machine asynchrone double étoile (MASDE) qui comprend deux bobinages statoriques triphasés fixes et un bobinage rotorique mobile. Les deux étoiles sont déphasées entre elles d'un angle électrique ($\alpha=\pi/6$) chacune d'elle comporte trois enroulements, leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique ($2\pi/3$) et sont alimentés par un système de tensions équilibrées, ce qui en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer[HAD01].

Dans le présent chapitre, nous commençons par un état d'art et une classification générale des machines électriques, une présentation des différentes structures des machines asynchrones multiphasées tout en citant leurs domaines et leurs caractéristiques en citant les avantages et inconvénients.

I. Etat de l'art sur les machines triphasées

Un système de courant (ou tension) triphasé est constitué de trois courants (ou tensions) sinusoïdaux de même fréquence de même amplitude qui sont déphasés entre eux d'un tiers de tour soit $2\pi/3$ dans le cas idéal. Si la fréquence est de 50 Hz, alors les trois phases sont retardées l'une par rapport à l'autre de 1/150 seconde (soit 6,6 ms). Lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, le système est dit équilibré [HAD01].

Dans le cas de la distribution électrique, le réseau peut se modéliser par trois sources de tension sinusoïdal d'amplitude identique, par exemple 230 V efficaces dans la plupart des pays européens, présentant un angle de phase de 120° entre elles. Idéalement la tension des trois

phases est constante et indépendante de la charge, seul le courant de chaque phase devant être dépendant de la puissance de sortie.

I.1 Classification des machines électriques

I.1.1 Machines à courant continu

La machine à courant continu (MCC) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle de l'énergie. Suivant la méthode de création du champ magnétique. On distingue les excitations électromagnétique et magnétoélectrique. Si la première est créée à l'aide de bobines, la seconde est réalisée à l'aide d'aimants permanents.

L'excitation électromagnétique est la plus répandue. Elle peut être obtenue à l'aide d'une source d'alimentation indépendante, ou bien à travers l'induit (auto excitation). Selon le mode de connexion de l'enroulement d'excitation par rapport à l'induit qui a une grande influence sur les propriétés de la machine, on distingue les excitations indépendante, shunt, série et composée.

Les MCC de conception usuelle sont utilisées en moteur et en générateur. Elles sont réalisées pour différentes gammes de puissances, de tensions et de vitesses de rotation. Cependant la présence du collecteur limite ces machines en puissance et en tension. Leur atout principal réside dans la simplicité de commande et de régulation.

Même si elles sont de moins en moins utilisées dans le domaine de l'industrie, leur emploi comme moteur reste sans équivalent dans le domaine des faibles vitesses ; les équipement domestiques, automobiles (essuie-glace, ventilateurs, démarreur). La figure I.1 représente un moteur à courant continu.

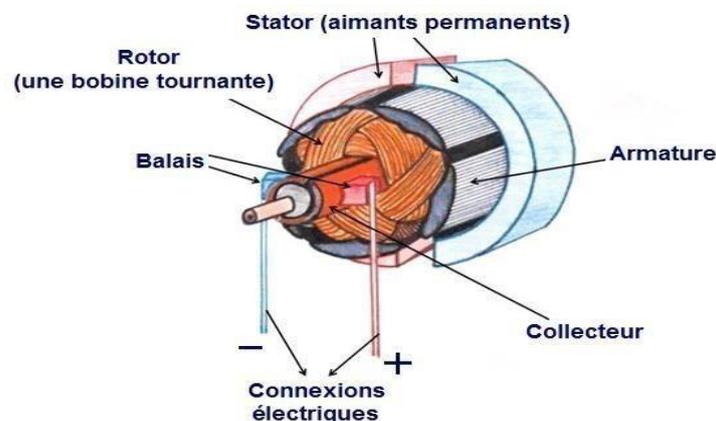


Figure I.1 Moteur à courant continu

I.1.2 Machines synchrones

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotoriques est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotoriques est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrones à rotor bobiné.
- les machines synchrones à réluctance variable.
- les machines synchrones à aimants permanents.

La figure I.2 représente un moteur à aiment permanent en géométrie cylindrique.



Figure I.2 Moteur à aimants permanent en géométrie cylindrique

Le stator de la machine synchrone à aimants permanents est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120° . Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

I.1.3 Machines asynchrones

On distingue trois types de machines asynchrones selon le type de rotor sont bobiné, massif ou à cage d'écureuil.

Ils sont caractérisés par un fonctionnement stable, une vitesse pratiquement constante et un rendement élevé autour de la charge nominale [SITE1].

A. Machines asynchrones à cage d'écureuil

Les avantages des moteurs à cage d'écureuil résident dans leur simplicité de construction, de manœuvre et d'entretien, leur robustesse mécanique et leur faible prix de revient. Le moteur asynchrone est très couramment utilisé dans une gamme de puissances allant de quelques Watts à plusieurs milliers de kilowatts. La figure I.3 représente une machine à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement.

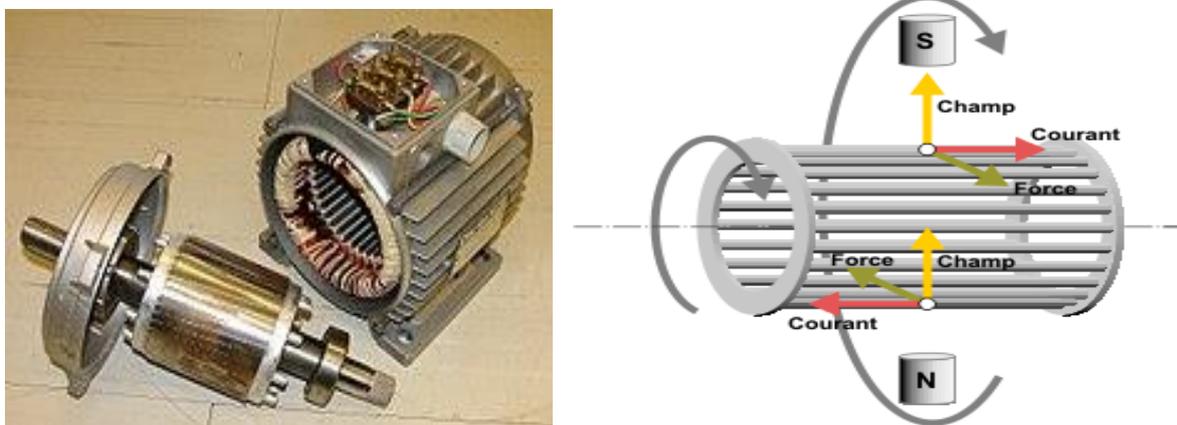


Figure I.3 Machine asynchrone à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement

B. Machines asynchrones à rotor bobiné

On dispose des fils de conducteurs dans les encoches formant ainsi un bobinage polyphasé de même nombre de paires de pôles que le stator. En général, c'est un bobinage triphasé connecté en étoile et relié à trois bagues fixées sur l'arbre et sur lesquelles frottent des balais fixés sur le stator, d'où l'on branche un rhéostat ou un convertisseur statique de fréquence (récupération d'énergie) afin d'améliorer le démarrage (un couple électromagnétique élevé et un faible appel de courant statorique). La figure I.4 représente une machine asynchrone à rotor bobiné.

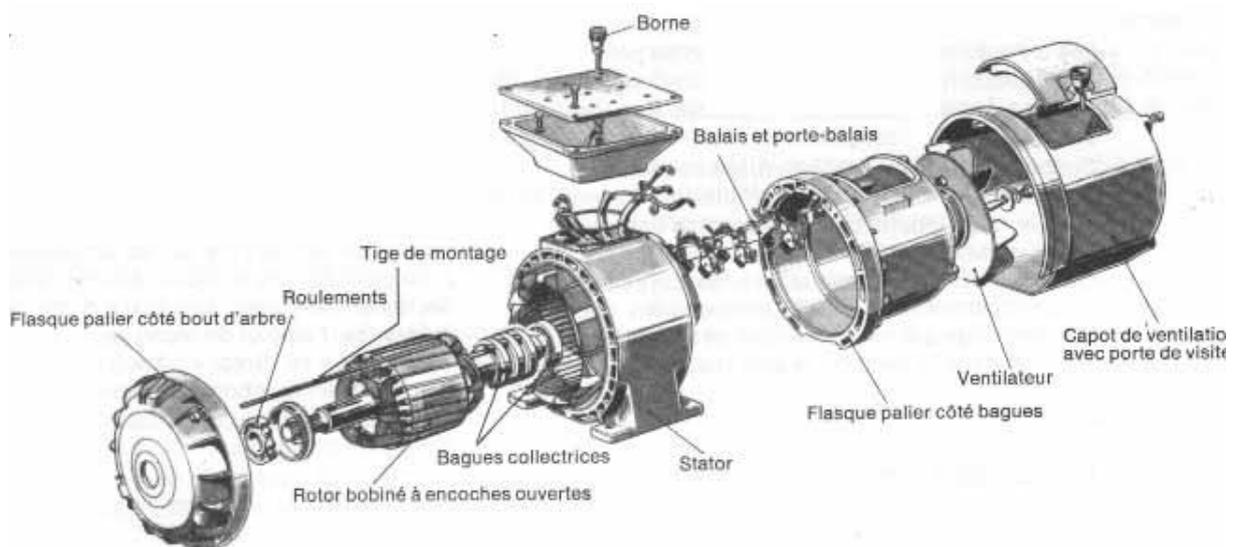


Figure I.4 Machine asynchrone à rotor bobiné

I.2 Etat de l'art sur les machines multiphasées

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées telles [HAD01] :

- Améliorer les performances des machines alimentées par des tensions ou courants de forme rectangulaire (onduleurs fonctionnant en pleine onde).
- Diminuer les ondulations du couple électromagnétique et les pertes rotoriques.

- Améliorer la fiabilité en offrant la possibilité de fonctionner correctement en régimes dégradés (une ou plusieurs phases ouvertes).
- Elargir les possibilités de commande par commutation de la vitesse synchrone, en changeant la séquence des tensions appliquées à la machine.
- Diminuer le contenu harmonique du courant du bus continu lors d'une alimentation par onduleurs.

Une première solution de fractionnement consiste à doter les machines de six phases (Hexaphasée) réparties en deux étoiles indépendantes, la machine polyphasée issue de cette association permet de bénéficier des acquis de la réalisation des bobinages triphasés. Dans cette association, les pôles magnétiques formés par les bobinages sont décalés d'un angle de 30° . Les enroulements de ces machines sont le plus souvent alimentés de manière indépendante par des onduleurs de courant pleine onde en répartissant judicieusement les courants entre les groupes de phases afin d'éviter les effets d'induction mutuelle [IFF16].

I.2.1 Domaine d'applications

Les machines multiphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissance élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment [MEH, MEO17].

I.2.2 Caractéristiques des machines multiphasées

On distingue habituellement deux types de machines multiphasées, suivant le nombre de phases statoriques qui est ou non un multiple de trois. On peut ainsi les classer en deux groupes, que l'on nommera « machines multiphasées de type 1 » et « machines multiphasées de type 2 ». De plus, on considère rarement les cas où le nombre de phases est un nombre pair, sauf si celui-ci est un multiple de trois. [IFF16].

Machines multiphasées de type (1)

Les machines multiphasées de « type 1 » sont des machines, dont le nombre de phases statoriques q est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en η étoiles triphasées $q = 3 \eta$ ($\eta = 1, 2, 3, 4, \dots$), ces machines sont aussi appelées « machines multi-étoiles ».

Remarquons qu'il est en général préférable, en fonctionnement normal, d'avoir autant de neutres que d'étoiles, c'est-à-dire η neutres isolés.

Or, pour un nombre donné de phases, il peut y avoir plusieurs configurations possibles suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes (ceci correspondant au décalage entre étoiles).

En effet, une machine double étoile ($q=6$) dont les étoiles sont décalées de ($\alpha = \pi/6$) a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \pi/3$. Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un « nombre équivalent déphasés », note $q\alpha$, dont la définition est $q\alpha = \pi/\alpha$.

Une machine ayant six phases régulièrement décalées de $\pi/3$ a en effet les mêmes caractéristiques de fonctionnement (concernant les harmoniques de temps) qu'une machine triphasée (pour laquelle $q=3$). Le tableau I.1 donne des détails sur quelques exemples de machines multi-étoiles [IFF16].

Tableau I.1 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasées de type 1) [IFF16].

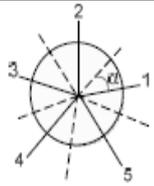
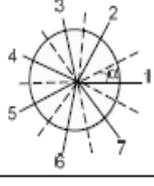
Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases ($q\alpha$)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
3	3	$\pi/3$	
6	3	$\pi/3$	
6	6	$\pi/6$	
9	9	$\pi/9$	
18	9	$\pi/9$	

A. Machines multiphasées de type (2)

Les machines multiphasées de « type 2 » sont des machines, dont le nombre de phases statoriques q est un nombre impair. Si α désigne le décalage entre deux bobines adjacentes, les q phases sont alors régulièrement décalées de $2\pi/q = 2\alpha$. On a donc toujours $q=\pi/\alpha$.

Le tableau I.2 présente quelques exemples de machines multiphasées de type 2 [IFF16].

Tableau I.2 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasées de type 2) [IFF16]

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
5	5	$\pi/5$	
7	7	$\pi/7$	
9	9	$\pi/9$	

I.2.3 Applications des machines multi-phasées

Il existe plusieurs domaines d'applications des machines multi-phasées les performances dynamiques des systèmes de production d'énergie électrique des enroulements statorique de la machine asynchrone double étoile, à fréquence variable, avec des charges inductives et capacitives. Dans ce système de production, l'enroulement de puissance produit de l'électricité pour alimenter les charges, et l'enroulement de commande est relié à un convertisseur statique d'excitation afin de maintenir la tension de sortie stable figure I.5.

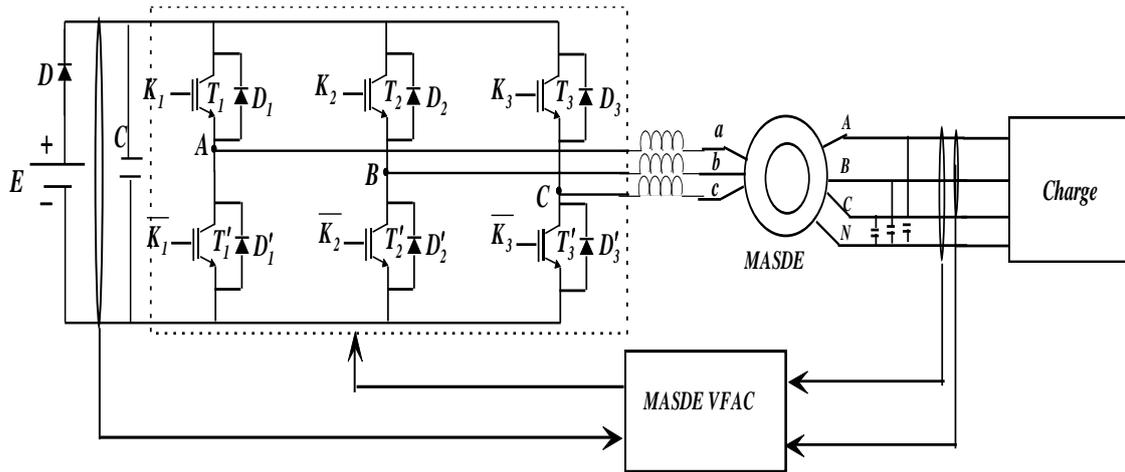


Figure I.5 Stratégie de contrôle des systèmes de production d'énergie électrique de la GASDE

Les machines multiphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées. Parmi ces applications on cite les systèmes embarqués, les pompes les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc.

Une autre application concerne l'utilisation des machines multiphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne : la machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux (Figure I.6).

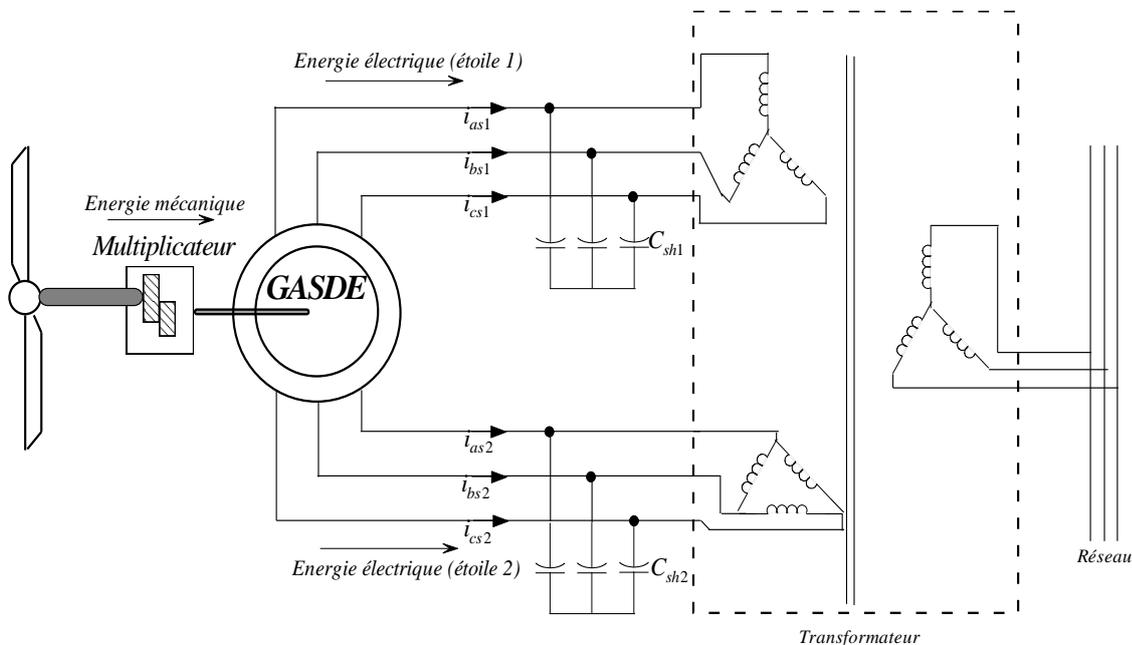


Figure I.6 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases avec un agnele de déphasage de $\pi/6$ [LAK14]

I.2.4 Avantages des machines multiphasées

Les machines multiphasées sont plus avantageuses que celles conventionnelles (triphases). Parmi ces avantages, on peut citer : la segmentation de puissance, la fiabilité, la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

A. Elimination d'harmoniques d'espace

Plus la valeur de q_a (nombre équivalent de phase dont $q_a = \frac{\pi}{\alpha}$) est grande, plus les rangs des premiers harmoniques d'espace existants sont élevés. Ces derniers sont ceux de rang dix-sept et dix-neuf pour la machine à neuf phases par exemple [CHE15].

B. Segmentation de puissance

A puissance donnée, lorsqu'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase. La segmentation de puissance dans les machines multiphasées permet de réduire les courants de phases sans augmenter les tensions par phases et par conséquent sur les courants à travers les semi-conducteurs constituant les convertisseurs statiques alimentant ces machines.

C. Amélioration de la fiabilité et le degré de liberté

La fiabilité de la machine polyphasée est plus élevée que celle de la machine triphasée, car l'augmentation de nombre de phases va donner pour le système une fonction risque très petite que celle de la machine triphasée. Même si un des enroulements ou un des deux onduleurs soit hors d'usage pour une raison quelconque, le moteur a la possibilité de continuer à tourner avec l'autre enroulement. Cette caractéristique revêt un grand intérêt dans certaines applications (traction navale, traction ferroviaire, etc.) [CHE15]. Le régime dégradé (la perte d'une ou plusieurs phases) engendre une perte de contrôle de la machine triphasée, des ondulations du couple de fortes amplitudes, ainsi qu'une diminution de la puissance mécanique. Pour faire fonctionner la machine triphasée avec une ouverture de phase, une solution a été proposée dans les référentiels [RIV13, LIU93] qui consiste à relier le neutre de la machine au point milieu de la source de tension continue. Néanmoins, avec les machines ayant une structure multi-phasée [ALB12].

D. Augmentation du couple massif

L'augmentation du couple électromécanique d'une machine multi-étoiles a été proposée par [LYR02] pour un bobinage de type concentrique et double étoiles. Les auteurs ont proposé d'exploiter l'harmonique d'ordre trois de force magnétomotrice pour augmenter le couple. L'étude a été expérimentalement validée, où on note une augmentation de 40% du couple et 21% de la densité de flux par rapport à la machine triphasée équivalente.

I.2.5 Inconvénients des machines multiphasées

Tout d'abord, la MASDE est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

1. 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 convertisseur-machine.

2. l'apparition des courants harmonique de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

3. Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée pour les convertisseurs statiques spécifiés et adapté pour les machines multiphasées de type 2, puisque les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à Multiphasées de type 2 [BER16].

Lors de l'alimentation par onduleur, les courants non générateurs du couple électromagnétique de la machine électrique multi-phasée provoquent un déséquilibre entre les phases statoriques ce qui engendre des pertes Joule statoriques additionnelles ainsi qu'un surdimensionnement des semi-conducteurs [CIT14]. Ces courants peuvent atteindre de fortes amplitudes de fait qu'ils sont limités par une impédance faible relative aux inductances de fuite et la résistance statoriques.

I.3 Caractéristiques des machines asynchrones double étoile (MASDE)

La multiplication du nombre des semi-conducteurs complique le système de commande. La machine asynchrone triphasée à double étoile est une machine qui comporte deux stators fixes déphasés entre eux d'un angle α et un rotor mobile, parmi les angles les plus utilisés on trouve le plus souvent $\alpha = 30^\circ$.

Chaque stator de la machine asynchrone à double étoile est composé de trois enroulements identiques à p paires de pôles. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égale $2\pi/3$. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique.

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé équilibré de courants entraînant la création d'un champ tournant le long de l'entrefer.

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de paires de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques telle que : $\Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator.

La structure électrique du rotor est de type cage d'écureuil (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques). Ce choix permet d'obtenir des machines robuste, facile d'emploi et nécessitant un entretien limité.

La machine à double étoile est représentée par deux enroulements statoriques A_{s1}, B_{s1}, C_{s1} et A_{s2}, B_{s2}, C_{s2} qui sont déphasés de α entre eux, et trois phases rotoriques : A_r, B_r, C_r .

La MASDE, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices. En plus des hypothèses de la machine généralisée, on admettra que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques, (les six phases ont donc les mêmes caractéristiques électriques).

I.4 Principe de fonctionnement de la MASDE

On prend comme exemple le principe de fonctionnement de la machine double étoile. Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 est alimentée par des courants triphasés et l'étoile 2 alimentée par les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle α). La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statorique c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

Ces deux champs tournant produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse ω_r inférieur à celle du synchronisme $\omega_r < \omega_s$.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse relative : $\omega = \omega_s - \omega_r$. On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce

glissement par le rapport : $g = \frac{\omega}{\omega_s} = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s}$

Conclusion

Ce premier chapitre a eu pour objectif de présenter quelques généralités sur les machines électriques relatives aux constructions, en premier lieu, nous avons présenté les différents types de construction des machines multiphasées et leurs avantages.

Après s'être familiarisé avec les machines multi-phases tout en connaissant les avantages et les inconvénients qu'elles peuvent offrir, nous pouvons dès lors passer à la modélisation de la machine double étoile, C'est l'objectif du deuxième chapitre.

Introduction

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Cependant, la modélisation d'une telle machine électrique est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement d'une part, d'autre part lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière [MER13].

Après la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques classiques nous étudierons dans un premier temps la MASDE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées (réseau électrique) en se basant sur la théorie unifiée des machines électriques classiques, dites encore théorie généralisée ; cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature), passant ensuite vers une études plus adéquate et plus performante ou on étudiera cette machine dans un repère dite (naturel).

Dans les deux cas, l'étude sera menée avec un décalage angulaire $\alpha = 30^\circ$. Enfin, des résultats de simulations seront présentés et commentés.

II.1 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 à cage d'écureuil. La figure II.1 représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles θ_r et $(\theta_r - \alpha)$ 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 [HAD01].

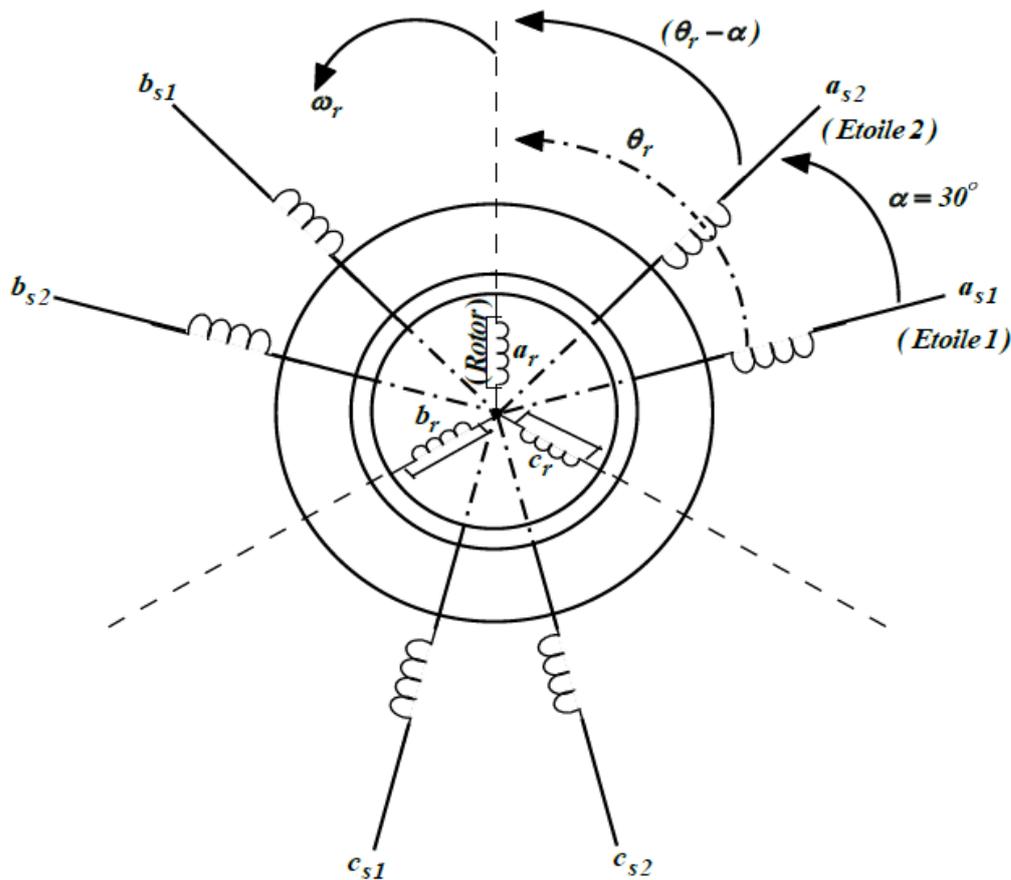


Figure II.1 Représentation schématique des enroulements de la MASDE

II.2 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone double étoile et la machine asynchrone triphasé avec leurs répartitions des enroulements et leurs géométries propres sont très complexes pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configuration exacte cependant, les modèles que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [CHE15] :

- Le circuit magnétique est non saturé.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, la f.m.m est variable, les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé.
- La machine est de constitution symétrique.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.

II.3 Modèle de la MAS triphasé dans le repère naturel $\langle abc \rangle$

équations de tensions et des flux au stator et au rotor, on a court-circuité le rotor d'où $[v_r]=0$:

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{cases} [\psi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\psi_r] = [L_r][i_r] + [M_{sr}]^T[i_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

En introduisant (II.2) dans (II.1) on aura

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}([L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_r][i_r] + [M_{sr}]^T[i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

En introduisant le changement de variable, on aura le système d'équations qui suit :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_s] \frac{d}{dt}[i_s] + \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][i_r] + [M_{sr}] \frac{d}{dt}[i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [L_r] \frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{d\theta} [M_{sr}]^T[i_s] + [M_{sr}]^T \frac{d}{dt}[i_s] \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Tel que : $\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$, ce qui nous mène à un nouveau système d'équations :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_s] \frac{d}{dt}[i_s] + \omega_r \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][i_r] + [M_{sr}] \frac{d}{dt}[i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [L_r] \frac{d}{dt}[i_r] + \omega_r \frac{d}{d\theta} [M_{sr}]^T[i_s] + [M_{sr}]^T \frac{d}{dt}[i_s] \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Les courants et les inductances statorique et rotorque sont donnés comme suit :

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix}, \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \quad [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & L_M & L_M \\ L_M & L_s & L_M \\ L_M & L_M & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & L_M & L_M \\ L_M & L_r & L_M \\ L_M & L_M & L_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Et on pose :} \quad [L_s] = [L_1] + [L_M], \quad [L_r] = [L_2] + [L_M]$$

$$\text{tel que :} \quad [L_1] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_2] = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_M] = \begin{bmatrix} 0 & L_M & L_M \\ L_M & 0 & L_M \\ L_M & L_M & 0 \end{bmatrix}$$

En remplaçant la matrice L_s par les matrices L_1 et L_M , de même la matrice L_r par les matrices L_2 , L_M respectivement dans (II.5), on obtient le système d'équations qui suit :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_1] \frac{d}{dt}[i_s] + [L_M] \frac{d}{dt}[i_s] + [M_{sr}] \frac{d}{dt}[i_r] + \omega_r \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [L_2] \frac{d}{dt}[i_r] + [L_M] \frac{d}{dt}[i_r] + [M_{sr}]^t \frac{d}{dt}[i_s] + \omega_r \frac{d}{d\theta} [M_{sr}]^t [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

La matrice mutuelle et sa dérivée ainsi que sa transposée sont données comme suit :

$$[M_{sr}] = L_M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] = -\omega_r L_M \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 4\pi/3) \\ \sin(\theta + 4\pi/3) & \sin(\theta) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 4\pi/3) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t = L_M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 4\pi/3) \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

On pose : $[e] = [e_1] + [e_2]$

Ce qui nous mène vers un système matriciel des f.e.m générées :

$$[e_1] = \begin{bmatrix} [L_M] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^t & [L_M] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}, \quad [e_2] = \begin{bmatrix} [0]_3 & [\dot{M}_{sr}] \\ [\dot{M}_{sr}]^t & [0]_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \\ e_{14} \\ e_{15} \\ e_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L_M & L_M & L_M \cos(\theta) & L_M \cos(\theta + 2\pi/3) & L_M \cos(\theta + 4\pi/3) \\ L_M & 0 & L_M & L_M \cos(\theta + 4\pi/3) & L_M \cos(\theta) & L_M \cos(\theta + 2\pi/3) \\ L_M & L_M & 0 & L_M \cos(\theta + 2\pi/3) & L_M \cos(\theta + 4\pi/3) & L_M \cos(\theta) \\ L_M \cos(\theta) & L_M \cos(\theta + 4\pi/3) & L_M \cos(\theta + 2\pi/3) & 0 & L_M & L_M \\ L_M \cos(\theta + 2\pi/3) & L_M \cos(\theta) & L_M \cos(\theta + 4\pi/3) & L_M & 0 & L_M \\ L_M \cos(\theta + 4\pi/3) & L_M \cos(\theta + 2\pi/3) & L_M \cos(\theta) & L_M & L_M & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_{21} \\ e_{22} \\ e_{23} \\ e_{24} \\ e_{25} \\ e_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_M \omega_r \sin(\theta) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) \\ 0 & 0 & 0 & -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 0 & 0 & 0 & -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta) \\ -L_M \omega_r \sin(\theta) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) & 0 & 0 & 0 \\ -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) & 0 & 0 & 0 \\ -L_M \omega_r \sin(\theta + 4\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta + 2\pi/3) & -L_M \omega_r \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}$$

La figure II.2 représente un schéma bloc de la machine asynchrone triphasée réalisé sur MATLAB/SIMULINK dans le model naturel.

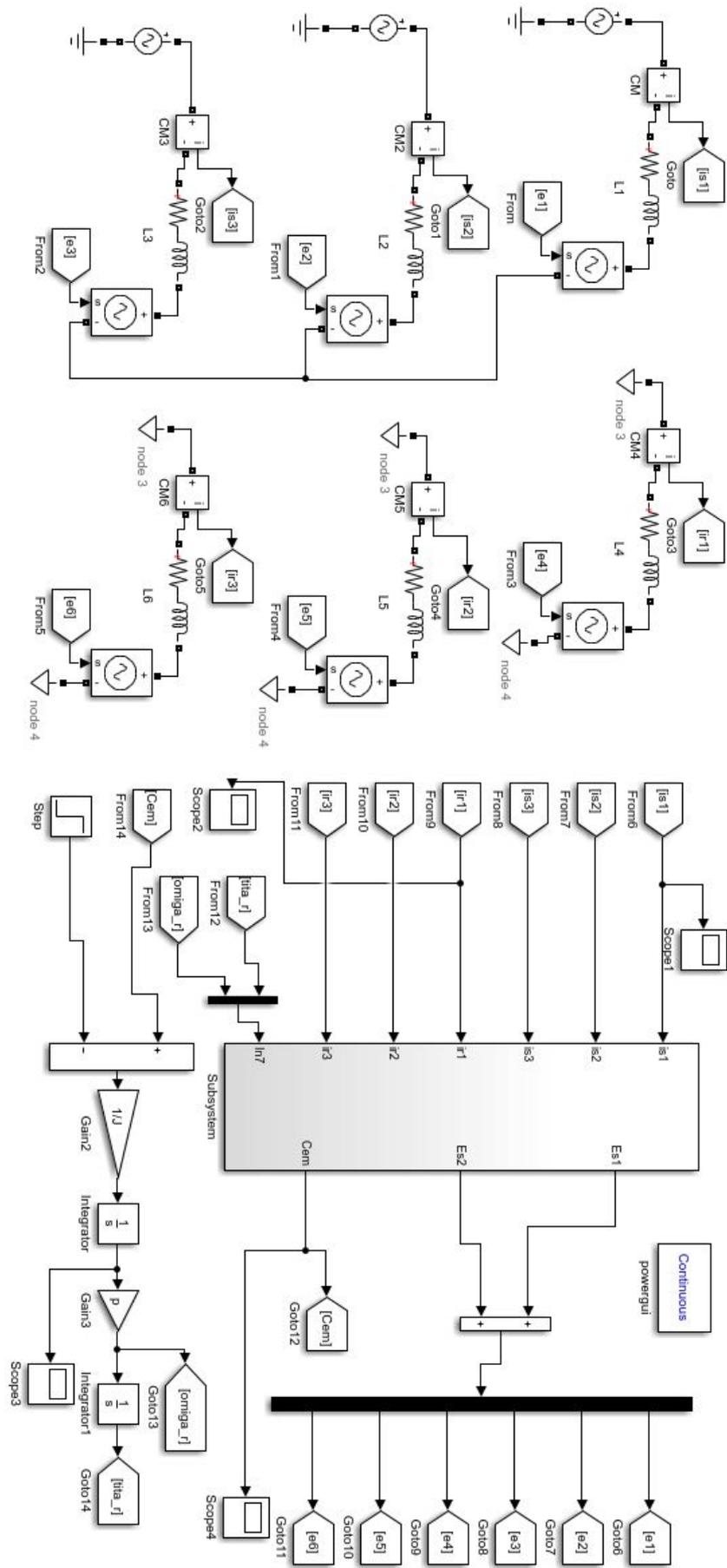


Figure II.2 Schéma bloc de la machine asynchrone triphasée réalisé sur MATLAB/SIMULINK dans le modèle naturel

II.4 Simulation et interprétations des résultats de la MAS triphasé dans le repère naturel $\langle abc \rangle$

Les figures II.3-II.6 montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MAS triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant $t = 1(s)$ d'une valeur de 100 (N.m), ou les paramètres sont donner dans l'annexe1.

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 1377(N.m), après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations.

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1(s) qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 1499(tr/min).

Au démarrage, les courants statoriques i_s passent par un régime transitoire dont les valeurs qui atteints 4 à 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 463.5A. Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 16A.

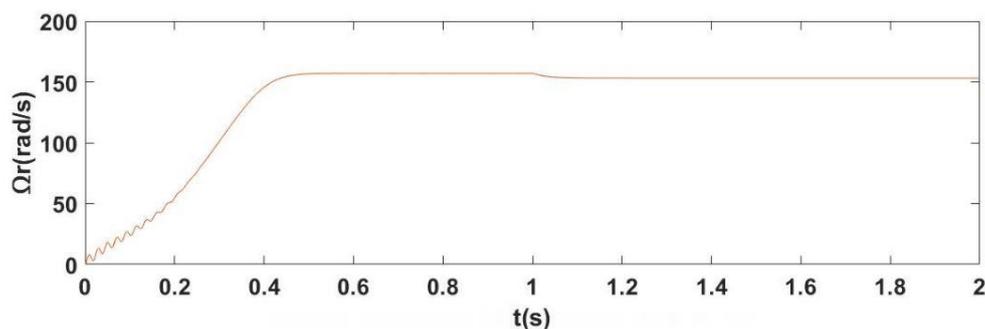


Figure II.3 Vitesse de rotation

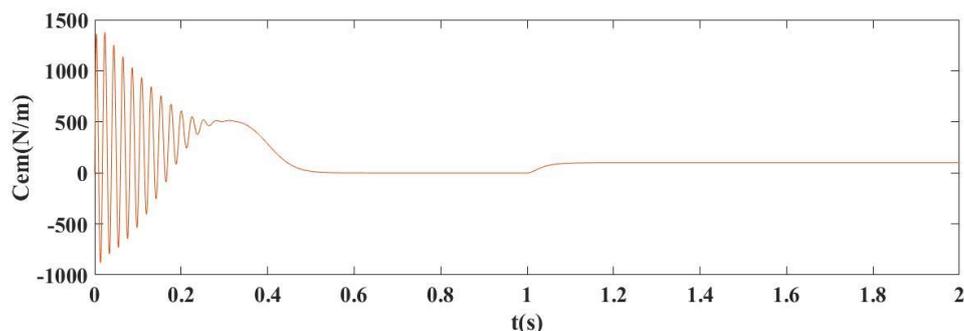


Figure II.4 Couple électromagnétique

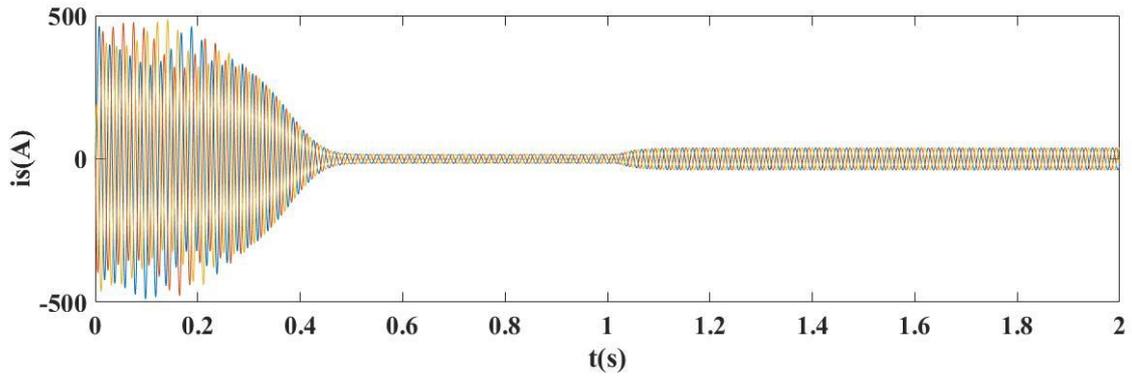


Figure II.5 Courants statoriques

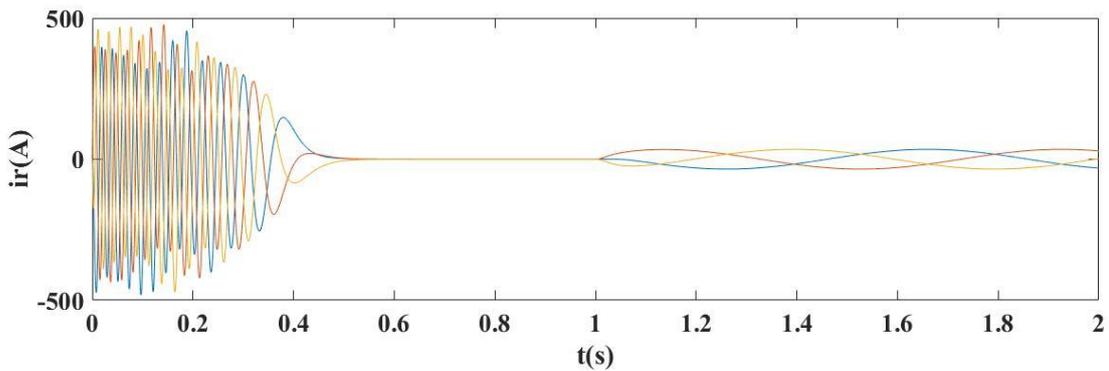


Figure II.6 Courants rotoriques

II.5 Modèle du la MASDE dans le système d'axes $\langle d, q \rangle$

II.5.1 Equations électriques

Les équations électriques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor sont respectivement exprimées par :

$$\begin{cases} [v_{s1}] = [r_{s1}] [i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\psi_{s1}] \\ [v_{s2}] = [r_{s2}] [i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\psi_{s2}] \\ [v_r] = [r_r] [i_r] + \frac{d}{dt} [\psi_r] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$[v_{s1}] = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix}, [v_{s2}] = \begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix}, [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned}
[i_{s1}] &= \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix}, [i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; \\
[\psi_{s1}] &= \begin{bmatrix} \psi_{as1} \\ \psi_{bs1} \\ \psi_{cs1} \end{bmatrix}, [\psi_{s2}] = \begin{bmatrix} \psi_{as2} \\ \psi_{bs2} \\ \psi_{cs2} \end{bmatrix}, [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix}; \\
[R_{s1}] &= \text{diag}[R_{as1} \ R_{bs1} \ R_{cs1}], [R_{s2}] = \text{diag}[R_{as2} \ R_{bs2} \ R_{cs2}], [R_r] = \text{diag}[R_{ar} \ R_{br} \ R_{cr}]
\end{aligned} \tag{II.11}$$

Ou : $R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{S1}$, $R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{S2}$, $R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$

II.5.2 Equations magnétiques

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} [\psi_{s1}] \\ [\psi_{s2}] \\ [\psi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{1,1}] & [L_{1,2}] & [L_{1,r}] \\ [L_{2,1}] & [L_{2,2}] & [L_{2,r}] \\ [L_{r,1}] & [L_{r,2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

$$[L_{11}] = \begin{bmatrix} (L_{f1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

$$[L_{22}] = \begin{bmatrix} (L_{f2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \tag{II.14}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{ms}) \end{bmatrix} \tag{II.15}$$

$$[L_{12}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$[L_{1r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[L_{2r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Les sous matrices sont données comme suit :

$$[L_{21}] = [L_{12}]^t, [L_{r1}] = [L_{1r}]^t \text{ et } [L_{r2}] = [L_{2r}]^t$$

Avec :

$$L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3} L_m$$

II.5.3 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta_{geo}} = P \frac{\partial W}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$W = \frac{1}{2} \left\{ [i_{s1}]^t [\psi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\psi_{s2}] + [i_r]^t [\psi_r] \right\} \quad (\text{II.20})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression :

$$C_{em} = P \left\{ [i_{s1}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{1,r}] [i_r] + [i_{s2}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{2,r}] [i_r] \right\} \quad (\text{II.21})$$

II.5.4 Equation mécanique :

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{W_r}{P} \quad (\text{II.23})$$

Et :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.24})$$

II.6 Modèle biphasé de la MASDE selon le système d'axes $\langle d, q \rangle$

II.6.1 Transformation de Park

La modélisation de la MASDE passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Pour cela, on applique les matrices de passage de Park direct et inverse suivantes :

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 4\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta + 4\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[A_{ps2}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[A_{pr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

La matrice inverse de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 4\pi/3) & -\sin(\theta + 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\theta = \int_0^t \omega_{\text{coor}} dt : \text{angle entre les systèmes d'axes biphasés et triphasés.}$$

ω_{coor} : vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

II.6.2 Choix du système d'axes

II.6.2.1 Système d'axes $\langle \alpha, \beta \rangle$

Ce système est immobile par rapport au stator, donc :

$$\omega_{\text{coor}} = 0 \text{ ce qui implique } \theta = 0$$

II.6.2.2 Système d'axes $\langle x, y \rangle$

Celui-ci est immobile par rapport au rotor, Alors :

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_r \text{ implique } \theta = \int_0^t \omega_r dt$$

II.6.2.3 Système d'axes $\langle d, q \rangle$

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques.

$$\text{D'où : } \omega_{\text{coor}} = \omega_s \text{ implique } \theta = \int_0^t \omega_s dt$$

II.7 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes $\langle d, q \rangle$

En appliquant les matrices de Park dans le système d'équation (II.10) on obtiendra le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} v_{d1} = R_1 i_{d1} + \frac{d}{dt} \psi_{d1} - \omega_s \psi_{q1} \\ v_{q1} = R_1 i_{q1} + \frac{d}{dt} \psi_{q1} + \omega_s \psi_{d1} \\ v_{d2} = R_2 i_{d2} + \frac{d}{dt} \psi_{d2} - \omega_s \psi_{q2} \\ v_{q2} = R_2 i_{q2} + \frac{d}{dt} \psi_{q2} + \omega_s \psi_{d2} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_{gl} \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_{gl} \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{cases} \psi_{d1} = L_{f1}i_{d1} + L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \psi_{q1} = L_{f1}i_{q1} + L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \psi_{d2} = L_{f2}i_{d2} + L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \psi_{q2} = L_{f2}i_{q2} + L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta}{dt}, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{et} \quad \omega_{gl} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

En introduisant le systèmes d'équations (II.30) dans (II.29) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L] \frac{d}{dt}[I] + \omega_{gl}[C][I] + [D][I] \quad (\text{II.31})$$

Où :

$$[U] = \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{d2} \\ v_{q2} \\ v_{dr} \\ v_{q1} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de commande ; } [I] = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{dr} \\ i_{q1} \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'état, et } [\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I] ;$$

$$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] ;$$

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_{f1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{f1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{f2} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{f2} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_1 & -\omega_s(L_{f1} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_m \\ -\omega_s(L_{f1} + L_m) & R_1 & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & R_2 & -\omega_s(L_{f2} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & -\omega_s(L_{f2} + L_m) & R_2 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.20) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt}[I] = [L]^{-1} \cdot \{ [B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I] \} \quad (\text{II.32})$$

II.7.1 Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axes $\langle d, q \rangle$, tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par :

$$P_a = v_{d1}i_{d1} + v_{q1}i_{q1} + v_{d2}i_{d2} + v_{q2}i_{q2} \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant les tensions (v_{d1}, v_{q1}, v_{d2} et v_{q2}) par leurs expressions dans (II.33), on trouve :

$$\begin{aligned} P_a &= [R_1 i_{d1}^2 + R_1 i_{q1}^2 + R_2 i_{d2}^2 + R_2 i_{q2}^2] \\ &+ \left\{ \frac{d\psi_{d1}}{dt} i_{d1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} i_{q1} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} i_{d2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} i_{q2} \right\} \\ &+ \omega_s (\psi_{d1} i_{d1} - \psi_{q1} i_{q1} + \psi_{d2} i_{d2} - \psi_{q2} i_{q2}) \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

L'expression (II.34) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;

- Le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) ;
- Le dernier terme est la puissance électromagnétique (P_{em}).

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = P \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.35})$$

Alors, l'expression du couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = P(\psi_{d1}i_{d1} - \psi_{q1}i_{q1} + \psi_{d2}i_{d2} - \psi_{q2}i_{q2}) \quad (\text{II.36})$$

En remplaçant les flux ($\psi_{d1}, \psi_{q1}, \psi_{d2}$ et ψ_{q2}) donné par (II.30) dans (II.36),

On obtient :

$$C_{em} = PL_m [(i_{q1} + i_{q2})i_{dr} - (i_{d1} + i_{d2})i_{qr}] \quad (\text{II.37})$$

A partir des équations des flux rotoriques (ψ_{d2} et ψ_{q2}) exprimées par (II.30).

On tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\psi_{dr} - L_m(i_{d1} + i_{d2})] \quad (\text{II.38})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\psi_{qr} - L_m(i_{q1} + i_{q2})] \quad (\text{II.39})$$

En introduisant (II.38) et (II.39) dans l'équation (II.37), on aura la relation du couple électromagnétique exprimé en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park $\langle d, q \rangle$ suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{q1} + i_{q2})\psi_{dr} - (i_{d1} + i_{d2})\psi_{qr}] \quad (\text{II.40})$$

Enfin, pour compléter la relation (II.40), on doit ajouter les équations (II.22) et (II.23). Les équations (II.22), (II.23), (II.29) et (II.40) constituent un modèle électromécanique complet de la MASDE, conformément aux hypothèses simplificatrices d'étude.

II.7.2 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes $\langle d, q \rangle$

Les figures II.7-II.14 montrent les résultats de simulation de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant $t = 1.7(s)$ d'une valeur de 15,52(N.m), et à l'instant $t=2.7(s)$ on a éliminé la charge, ensuite on a appliqué une autre charge négative a l'instant $t = 4(s)$ d'une valeur de -15.52(N.m) où les paramètres sont donnés dans annexe 2.

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 57(N.m), après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations.

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1(s) qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 2996(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 qui atteints 4 à 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 26.8(A). Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 1.3(A). A noter que les deux étoiles ont les mêmes paramètres.

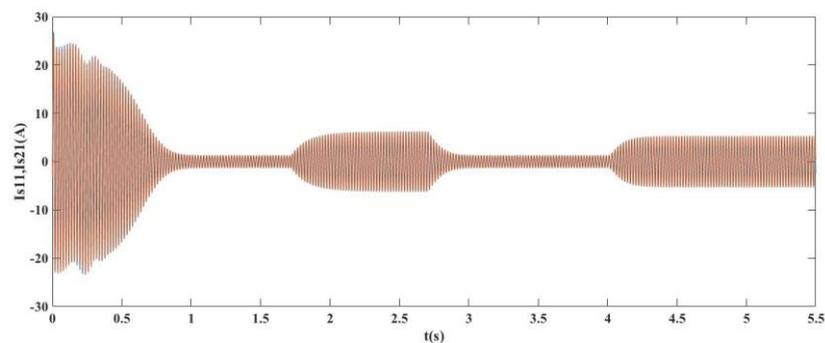
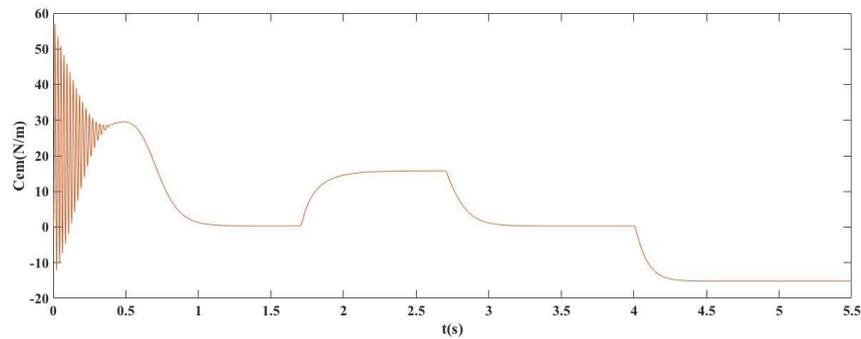
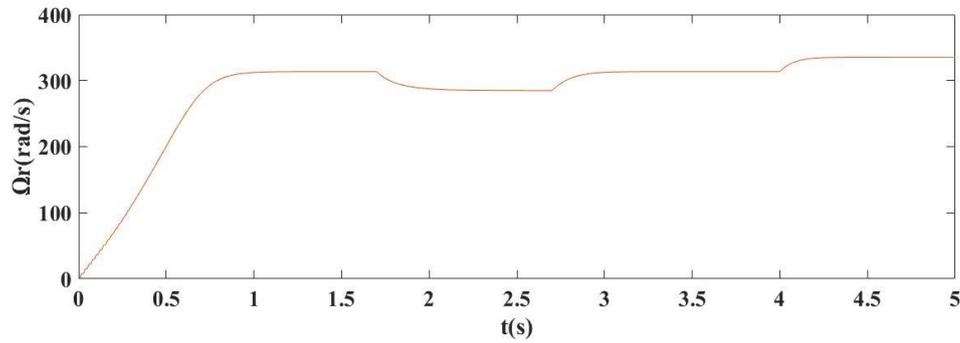
Pour les deux courants statoriques d'axe d, ils ont la même forme, sont de signe négatif et se stabilisent à la valeur -1.6(A). Sur l'axe q, on constate qu'ils ont la même forme et que les valeurs de ses courants établis sont presque nulles.

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 1.7(s)$ provoque une perturbation qui sera compensée par l'accroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de 15.7(N.m). Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 6.25(A). Pour la vitesse, on constate qu'elle chute jusqu'à 284.8(rad/s). À l'instant $t = 1.7(s)$, le courant statorique direct prend la valeur de -2.9(A), alors que le courant en quadrature prend la valeur de -7.08(A).

A l'instant $t=2.7(s)$, on a éliminé la charge d'où les valeurs des différents résultats vont être les mêmes que celle de fonctionnent à vide

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 4(s)$ provoque une perturbation qui sera compensée par le décroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie

de $-15.52(\text{N.m})$. Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de $5.3(\text{A})$. Pour la vitesse on constate qu'elle augmente jusqu'à $335.5(\text{rad/s})$. À l'instant $t = 4(\text{s})$, le courant statorique direct prend la valeur de $-2.84(\text{A})$, alors que le courant en quadrature prend la valeur de $5.8(\text{A})$.



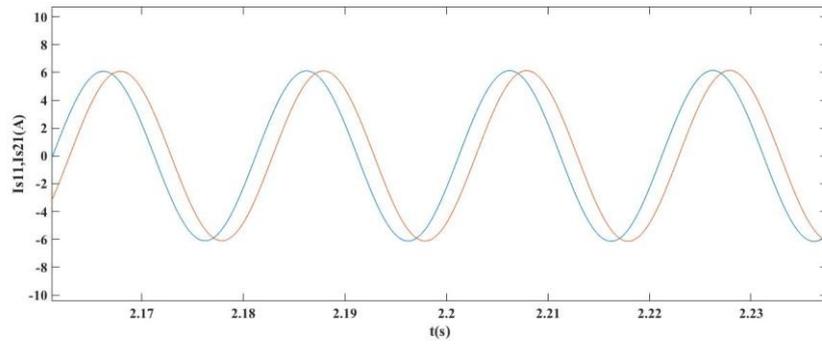


Figure II.10 Zoom des courants statoriques

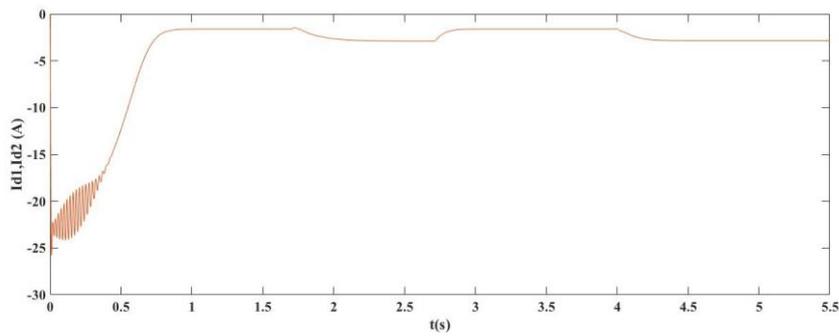


Figure II.11 Courants statoriques directs

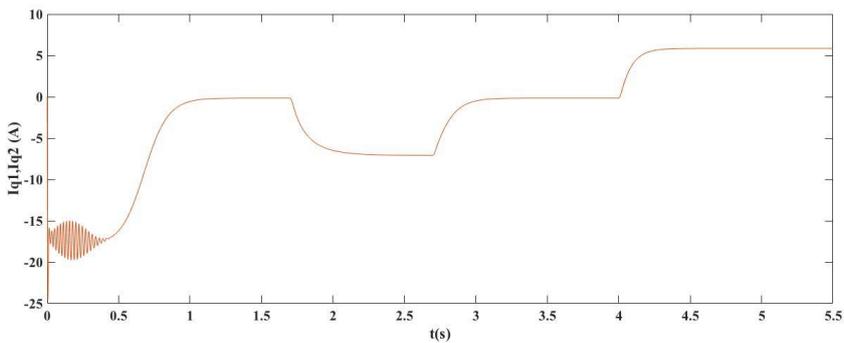


Figure II.12 Courants statoriques en quadrature

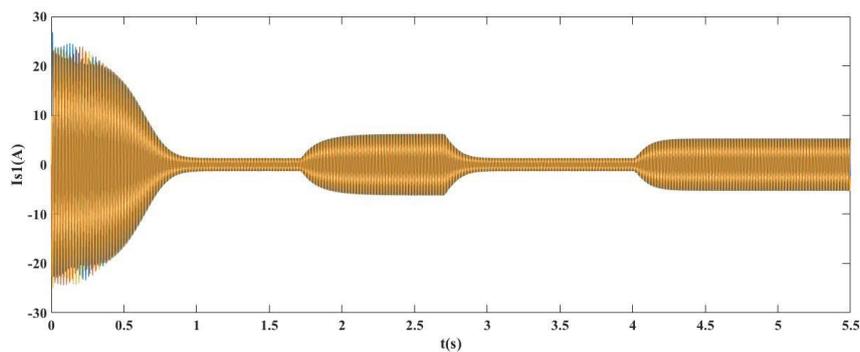


Figure II.13 Courants statoriques de la première étoile

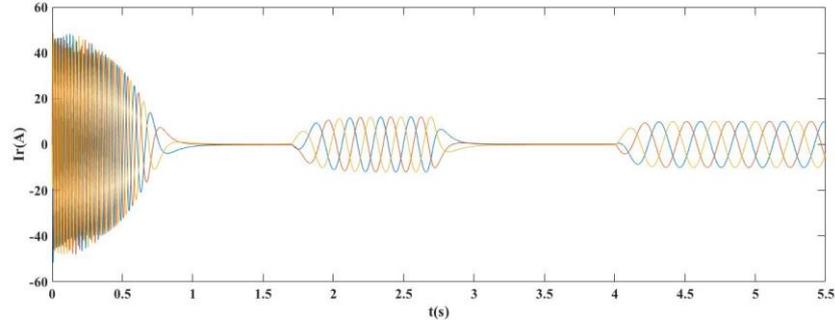


Figure II.14 Courants rotoriques réels

II.8 Modèle de la MASDE dans le repère naturel $\langle abc \rangle$

D'après les équations des tensions des deux étoiles et du rotor représentées dans (II.1) et en remplaçant les équations magnétiques (II.2) dans (II.1), on aura :

$$[v_{s1}] = [R_{s1}] [i_{s1}] + \frac{d}{dt} [L_{11}] [i_{s1}] + \frac{d}{dt} ([L_{12}] [i_{s2}] + [L_{1r}] [i_r]) \quad (\text{II.41})$$

$$[v_{s2}] = [R_{s2}] [i_{s2}] + \frac{d}{dt} [L_{22}] [i_{s2}] + \frac{d}{dt} ([L_{12}] [i_{s1}] + [L_{2r}] [i_r]) \quad (\text{II.42})$$

$$[v_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} [L_r] [i_r] + \frac{d}{dt} ([L_{1r}] [i_{s1}] + [L_{2r}] [i_{s2}]) \quad (\text{II.43})$$

Comme les inductances statoriques des deux étoiles et rotorique ne dépend pas du temps mais de θ_r , on établit un changement de variable, d'où les équations (II.41), (II.42) et (II.43) deviennent :

$$[v_{s1}] = [R_{s1}] [i_{s1}] + [L_{11}] \frac{d}{dt} [i_{s1}] + [L_{12}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} [L_{1r}] [i_r] + [L_{1r}] \frac{d}{dt} [i_r] \quad (\text{II.44})$$

$$[v_{s2}] = [R_{s2}] [i_{s2}] + [L_{22}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] + [L_{21}] \frac{d}{dt} [i_{s1}] \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} [L_{2r}] [i_r] + \frac{d}{dt} [L_{2r}] [i_r] \quad (\text{II.45})$$

$$[v_r] = [R_r] [i_r] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} [L_{1r}] [i_{s1}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} [L_{2r}] [i_{s2}] \quad (\text{II.46})$$

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

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[i_{s1}] = [L_{11}]^{-1} \left([v_{s1}] - [R_{s1}][i_{s1}] - [L_{12}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] - [L_{1r}] \frac{d}{dt}[i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{1r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_{s2}] = [L_{22}]^{-1} \left([v_{s2}] - [R_{s2}][i_{s2}] - [L_{21}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] - [L_{2r}] \frac{d}{dt}[i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{2r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_r] = [L_r]^{-1} \left([v_r] - [R_r][i_r] - [L_{r1}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] - [L_{r2}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{r1}][i_{s1}] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{r2}][i_{s2}] \right) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Remarque :

- Pour l'équation mécanique et celle du couple elles sont introduites déjà dans (II.22), (II.23).
- Les dérivées des inductances mutuelles entre la première étoile avec le rotor $\frac{d}{d\theta} [L_{1r}]$, et entre la deuxième étoile avec le rotor $\frac{d}{d\theta} [L_{2r}]$ sont données comme suite :

$$\frac{d}{d\theta} [L_{1r}] = -L_{sr} \omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{d}{d\theta} [L_{2r}] = -L_{sr} \omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

II.8.1 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le model naturel <abc>

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink, la MASDE est alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées.

Les figures (II.15-II.20) montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant $t = 1.7(s)$ d'une valeur de de 15,52(N.m), et on a éliminé la charge a l'instant $t=2.7(s)$ puis on a appliqué une autre charge négative a l'instant $t = 4(s)$ d'une valeur de -15.52(N.m).

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 57(N.m), après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations.

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1(s) qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 2996(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 qui atteints 4 à 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 26.8(A). Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 1.3(A). A noter que les deux étoiles ont les mêmes paramètres.

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 1.7(s)$ provoque une perturbation qui sera compensée par l'accroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de 15.7(N.m). Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 6.25(A). Pour la vitesse on constate qu'elle chute jusqu'à 284.8(rad/s). A l'instant $t=2.7(s)$ on a éliminé la charge d'où les valeurs des différents résultats vont être les même que celle de fonctionnent à vide.

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 4(s)$ provoque une perturbation qui sera compensée par le décroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de -15.52(N.m). Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 5.3(A). Pour la vitesse on constate qu'elle augmente jusqu'à 335.5(rad/s).

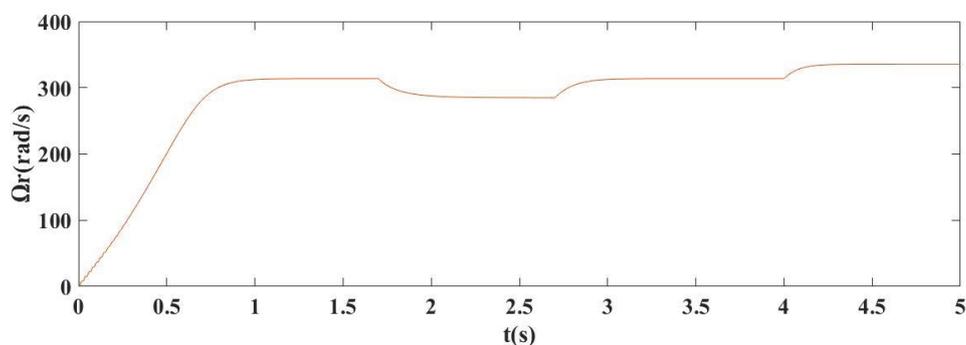


Figure II.15 Vitesse de rotation

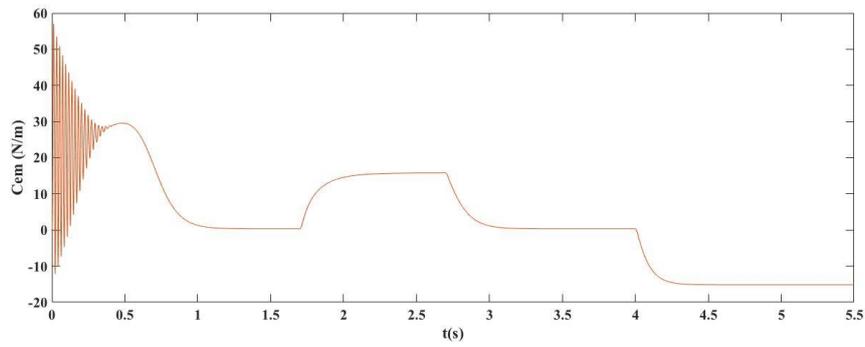


Figure II.16 Couple électromagnétique

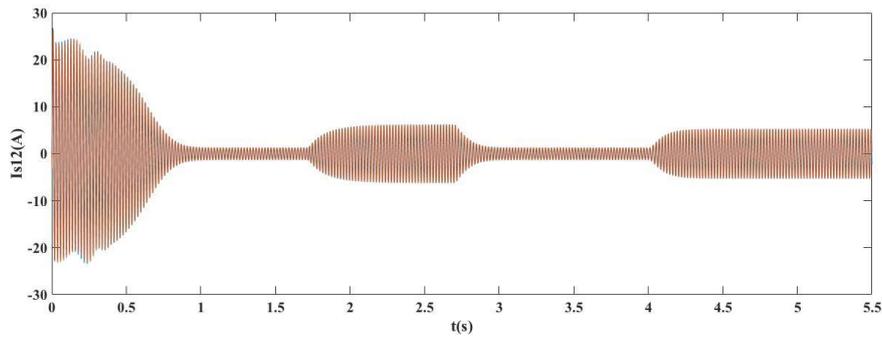


Figure II.17 Courants statoriques

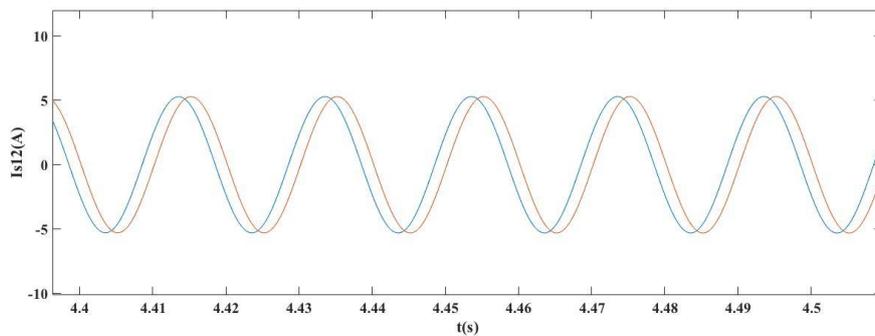


Figure II.18 Zoom des courants statoriques

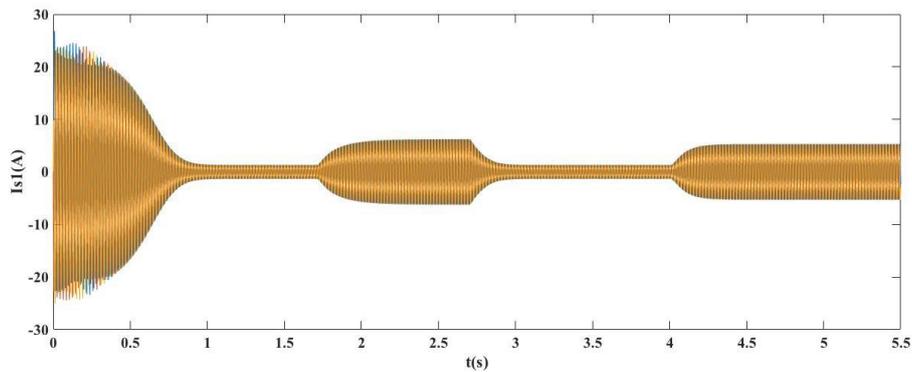


Figure II.19 Courants statoriques de la première étoile

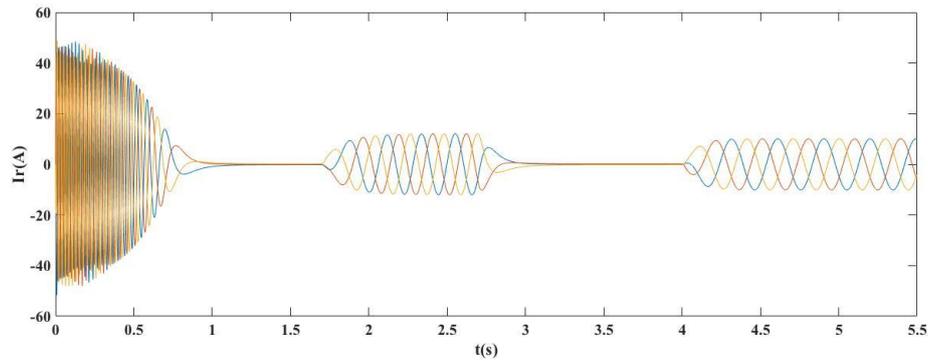


Figure II.20 Courants rotoriques

II.9 Comparaison entre le model d'axe $\langle d, q \rangle$ et le model naturel $\langle abc \rangle$

Les simulations des deux modèles nous montrent que les résultats sont identiques et ce pour la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, les courants statoriques ainsi que les courants rotoriques représentées respectivement dans les figures (II.21-II.24).

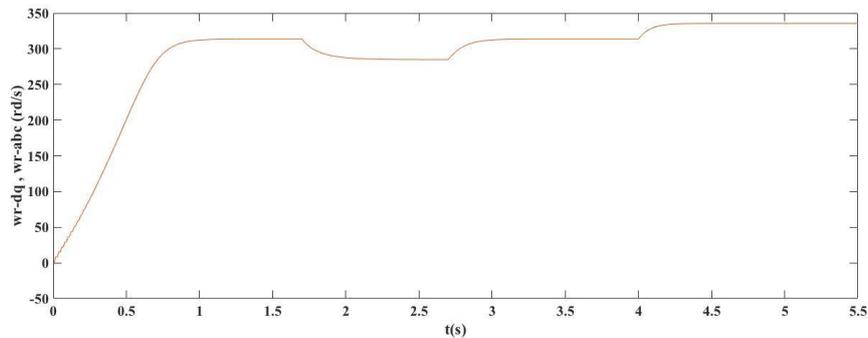


Figure II.21 Vitesses de rotations des deux modèle (Park et naturel)

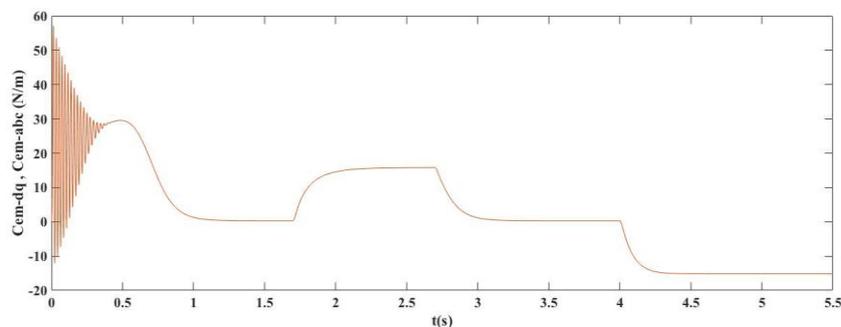


Figure II.22 Couple électromagnétique des deux modèles (Park et naturel)

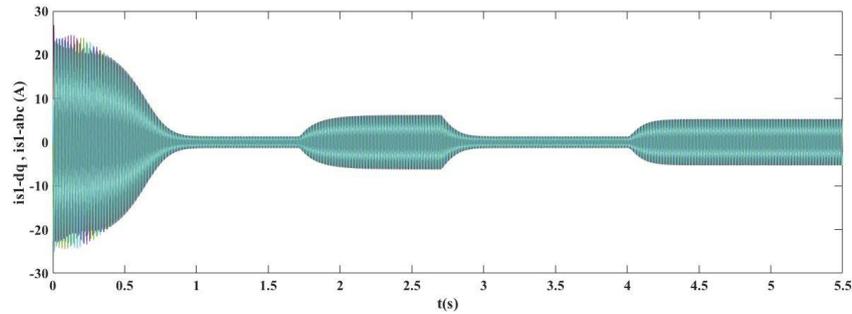


Figure II.23 Courants statoriques des deux modèles de Park et naturel

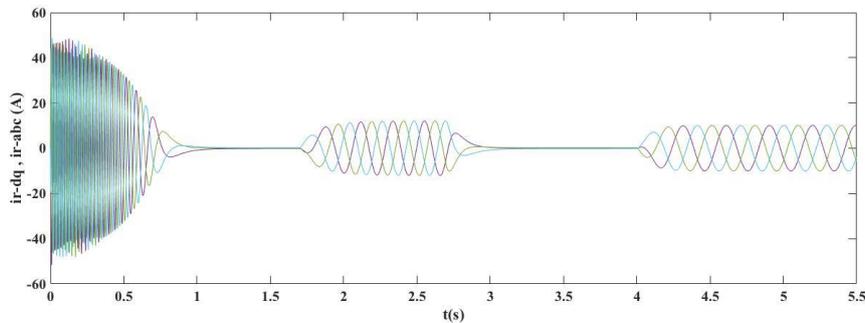


Figure II.24 Courants rotoriques des deux modèles de Park et naturel

Conclusion

Ce chapitre a présenté une brève description de la machine asynchrone double étoile à travers son modèle naturel, et il a fait l'objet de l'établissement d'un modèle mathématique de la MASDE basé sur la théorie unifiée des machines électriques tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

Une simulation de la MASDE par le logiciel Matlab/Sim power pour les modèles de Park et naturel sont élaborés puis une comparaison entre les deux modèles est faite, et cela pour faire une étude caractéristique de la MASDE directement alimentée par des sources sinusoïdales, et l'insertion de la charge dans cette dernière engendre une variation (diminution en fonctionnement moteur et augmentation en fonctionnement génératrice) de la vitesse. On a conclu que les résultats de simulation sont identiques pour les deux modèles, le modèle naturel nous permettra des nouvelles simulations de la MASDE.

Parmi les avantages du modèle naturel c'est qu'il nous donne la possibilité de travailler sur le régime dégradé, son inconvénient se régit sur le temps de simulation qui est assez grand.

Dans le chapitre suivant, on procédera à des simulations de MASDE en modèle naturel en mode dégradé dans les différents cas de défauts de la machine tel, l'ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques, court-circuit d'une phase.

Introduction

L'utilisation des machines à nombre de phases élevés, apporte un degré de fiabilité important puisqu'elles développent un couple moyen non-nul lorsqu'une ou plusieurs phases ne sont plus alimentées. Cependant, dans ce mode de fonctionnement, la qualité du couple coté récepteur mécanique et de l'énergie électrique demandée à la source électrique sont dégradées moins que la machine classique triphasée.

Dans ce chapitre, nous étudierons les cas de défauts suite à un court-circuit au niveau du bobinage statorique et à l'ouverture d'une ou de plusieurs phases statoriques. On montre également l'influence du nombre de phases sur le taux d'ondulation de couple en régime dégradé.

III.1 Différents defaults dans les machines multiphasées

Les différents défauts qui peuvent apparaître dans un système d'entraînement et engendrer la perte totale ou partielle d'un élément de celui-ci. Une défaillance est souvent considérée comme un incident engendrant un dysfonctionnement sur tous les éléments du système d'entraînement et conduisant à court, moyen et long terme à sa destruction. Pour satisfaire les exigences en matière de fiabilité, de sûreté de fonctionnement et de continuité de service, il est primordial que le système d'entraînement ne soit pas soumis à un arrêt total. Toute anomalie présente dans le système ne doit pas être une gêne à son bon fonctionnement et devra si possible permettre le fonctionnement en mode dégradé. Ce dernier ne permet pas dans un certain nombre de cas de transiter le maximum d'énergie disponible sur tout le system. Pour l'étude du régime dégradé des systèmes d'entraînements multiphasées, une classification est nécessaire selon les origines, les causes et les conséquences des défaillances [IFF16].

Une défaillance dans un entraînement électromécanique peut survenir à n'importe quel moment et avoir diverses origines. Ces origines peuvent être :

- Electriques (convertisseurs, machines tournantes) ;
- Mécaniques (roulements, accouplement, géométriques) ;
- Thermiques (environnement, ventilation) ;
- Instrumentales (capteurs) ;
- Matérielles (ordinateurs, microcontrôleurs, automates).

III.2 Régime dégradé

Les modes dégradés d'un entraînement électrique en vitesse sont nombreux. Ils peuvent survenir au niveau de la machine tel que l'ouverture ou court-circuit d'un ou plusieurs phases. Et du fait que la maintenance n'est pas forcement accessible au moment de l'apparition du défaut surtout dans les domaines de l'avionique et l'aérospatial' l'isolation d'une phase de la machine est la solution la plus appropriée. [MAO15]

La fiabilité de fonctionnement lorsqu'une ou plusieurs phases en défaut a tiré l'attention de nombreux chercheurs. Quand la machines est en mode sain, les tensions d'alimentation sont imposées de tel que les courants statoriques seront régulièrement décalés en phase et égaux en valeur maximale. Dans cette condition et à charge nominale, la puissance mécanique délivrée à l'arbre sera celle indiquée sur la plaque signalétique. Toutefois, lors d'une ouverture d'une phase, une perte considérable de la puissance mécanique, une ondulation de couple électromagnétique et des pertes à effet joule statoriques additionnelles se produit.

III.3 Défaillances dans la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone est considérée comme robuste mais peut être soumise à des contraintes au cours de fonctionnement, les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types, externes ou dues à l'environnement. Les défauts internes peuvent être classifiés concernant leurs origines c'est-à-dire électrique et mécanique généralement, [ADJ12] dont on cite certaines de ses dernières :

III.3.1 Défauts rotoriques

Il y a un certain nombre de raisons pour lesquelles des défauts de rotor peuvent se produire dans un moteur à induction dont on cite :

III.3.1.1 Défaut de barres rotoriques (cassure des barres)

Les bagues d'extrémité lourdes du rotor entraînent de grandes forces centrifuges qui peuvent entraîner des contraintes supplémentaires sur les barres du rotor. L'une des raisons, la barre du rotor peut être endommagée, ce qui entraîne une distribution asymétrique des courants du rotor.

Pour une telle asymétrie ou pour une longue course du moteur l'une des barres de rotor se fissure, une surchauffe se produira dans la position fissurée, ce qui peut conduire à une rupture de la barre.

Maintenant, si l'une des barres se casse, les barres latérales transporteront des courants plus élevés pour lesquels des contraintes thermiques et mécaniques plus importantes peuvent se produire sur ces barres latérales. Si le rotor continue à tourner dans cette condition, les barres latérales peuvent également se fissurer, ce qui peut entraîner la propagation des dommages et entraîner la rupture de plusieurs barres du rotor. Cette fissuration peut se produire à divers endroits du rotor, par exemple dans les barres, dans les bagues d'extrémité ou au niveau des joints des barres et des bagues d'extrémité. La possibilité est plus au niveau des articulations des barres et des anneaux d'extrémité. De plus, les possibilités de fissures augmentent si le temps de démarrage du moteur est long et si le moteur est sujet à de fréquents démarrages et arrêts [Springer].

Les causes principales de la rupture de la barre du rotor d'un moteur à induction peuvent être mentionnées, ponctuellement, comme suit :

- défauts de fabrication
- contraintes thermiques
- contrainte mécanique causée par des défauts de palier
- en raison de vieillissement du métal de la barre de rotor.

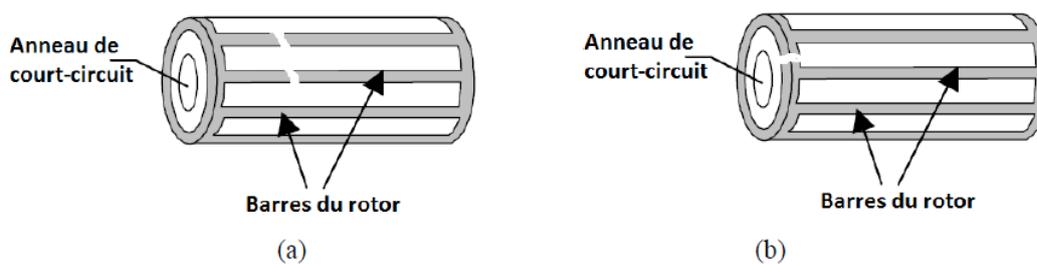


Figure III.1 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit

III.3.2 Défauts statorique

Le débarquement d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses d'où parmi ces dernières :

III.3.2.1 Défaut de court-circuit statorique

On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts circuits entre spires sont donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator. [ADJ12].

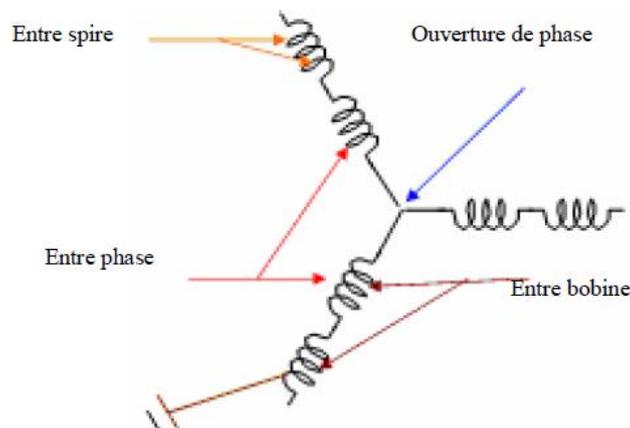


Figure III.2 Représentation des différents défauts statoriques possibles



Figure III.3 Exemples des dégâts dus au défaut de court-circuit statorique

III.4 Modèle de la MASDE avec l'ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques

Le modèle de la machine double étoiles dans la base naturelle nous permet d'étudier son comportement lors de la perte d'une ou de plusieurs phases statoriques. Après la modélisation de la MASDE dans le repère naturel qui a été élaborée dans le chapitre précédent, on a abouti à un système d'équations qui régit le comportement de la MASDE ci-après :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[i_{s1}] = [L_{11}]^{-1} \left([v_{s1}] - [R_{s1}][i_{s1}] - [L_{12}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] - [L_{1r}] \frac{d}{dt}[i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{1r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_{s2}] = [L_{22}]^{-1} \left([v_{s2}] - [R_{s2}][i_{s2}] - [L_{21}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] - [L_{2r}] \frac{d}{dt}[i_r] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{2r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_r] = [L_r]^{-1} \left([v_r] - [R_r][i_r] - [L_{r1}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] - [L_{r2}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{r1}][i_{s1}] - \omega_r \frac{d}{d\theta} [L_{r2}][i_{s2}] \right) \end{cases} \quad (III.1)$$

Le couple électromagnétique est donné par

$$\frac{d.\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - f.\Omega_r - C_r) \quad (III.2)$$

Avec : $\omega_r = p.\Omega_r$; $[v_r] = [0 \ 0 \ 0]^t$

La figure (III.4) présente le schéma de l’algorithme de simulation, pour la résolution du système d’équations différentielles (III.1). Le bloc de simulation est développé sous MATLAB/Simulink.

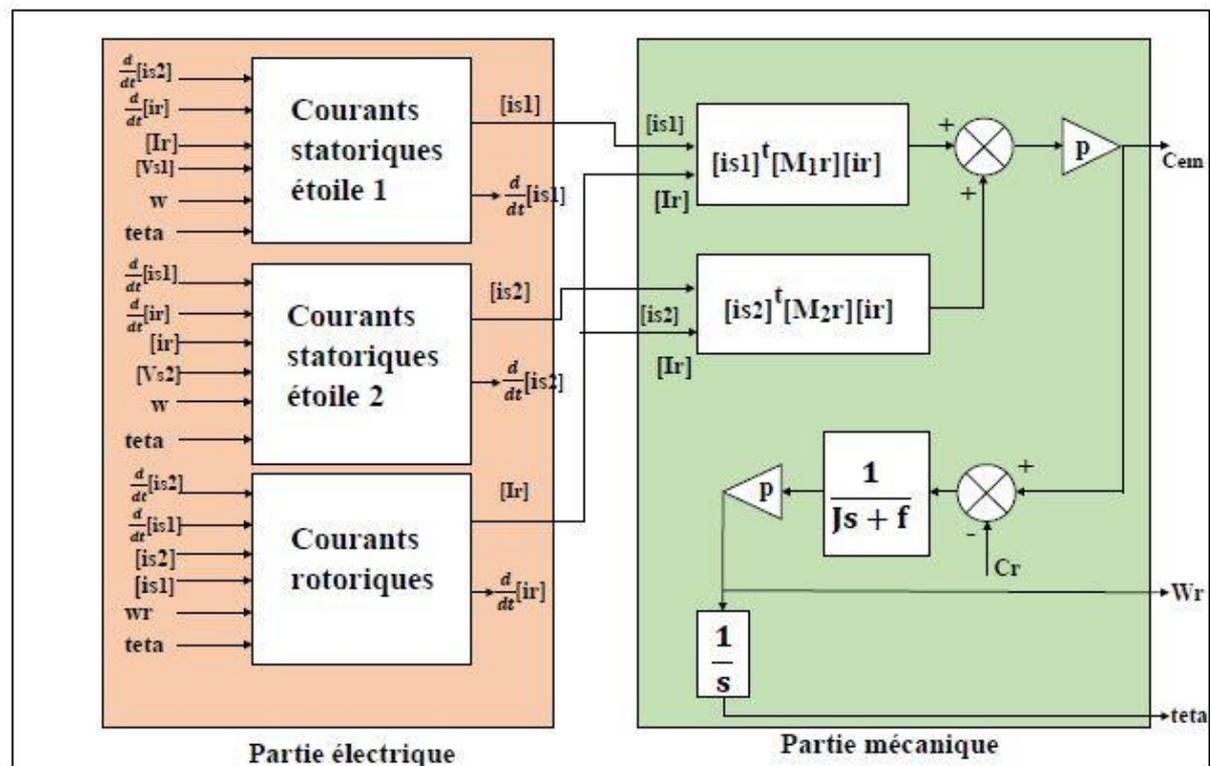


Figure III.4 Schéma de simulation de la MASDE dans le repère naturel

Pour procéder aux différents cas d’ouvertures de phases on augmente la valeur de la résistance de la phase concernée, cela pour simuler une déconnection de phase comme la montre la figure ci-dessous.

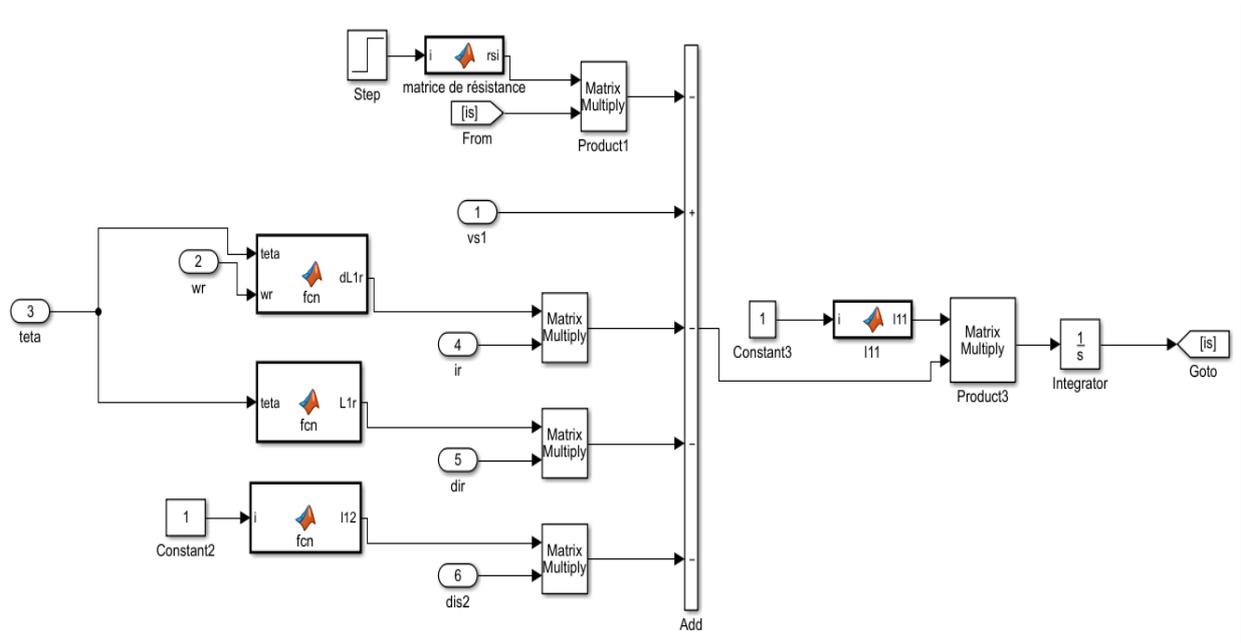


Figure III.5 : Schéma bloc sous MATLAB/Simulink de la MASDE

III.4.1 simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le model naturel $\langle abc \rangle$ en mode dégradé

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant ($t = 1.7$ s) d'une valeur de (10 N.m), puis on effectuera un ou plusieurs défauts à la MASDE dans les différents instants à savoir l'ouverture ou le court-circuit d'une phase ou plus, en procédant comme suit :

- ✓ Ouverture d'une seule phase suivie par une phase adjacente.
- ✓ Ouverture de deux phases non adjacentes.
- ✓ Elimination d'une étoile complète.
- ✓ Court-circuit d'une phase statorique

III.4.1.1 Ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente

Parmi les avantages de la machine asynchrone double étoile, sa propriété de fonctionner lors d'un défaut d'ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques, la perte d'une phase crée un déséquilibre dans la distribution des FMMs induites dans l'entrefer et conduit à une augmentation des ondulations du couple.

Dans cette simulation la machine asynchrone double étoiles avec deux phases adjacentes ouvertes et alimentée par une source sinusoïdale.

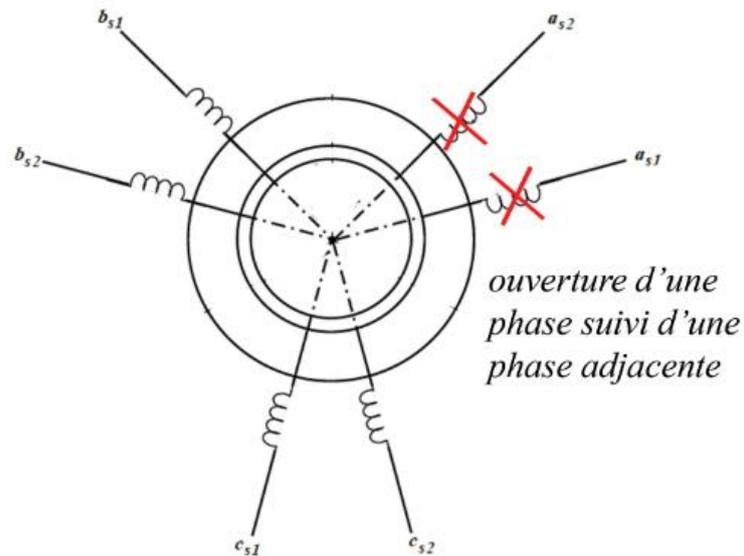


Figure III.6 Machine double étoiles lors de l'ouverture des deux phases adjacentes

Les figures (III.7-III.11) présentent les résultats de simulation d'un démarrage de la MSADE en mode sain puis nous avons effectué une ouverture d'une phase à l'instant $t=3(s)$, puis à l'instant $t=4(s)$ nous avons ouvert une autre phase adjacente à la première phase.

A $t=3(s)$ (ouverture d'une seule phase) provoque des ondulations de couple de $\Delta_{Cem} = \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{moy}} = \frac{11,75 - 7,97}{13,05} = 29\%$ suivie une chute de vitesse à une valeur de 296 (rd/s) puis à $t=4(s)$ (ouverture d'une deuxième phase) provoque une augmentation d'ondulation de couple à valeur de 65% et une diminution de vitesse rotorique à une valeur de 294(rd/s), représenté dans la figure III.7 et la figure III.8 respectivement.

Les figures (III.9-III.11) représentent les courants statoriques de la première étoile, les courants de la première phase de chaque étoile et les courants rotoriques respectivement, où les valeurs de courant de la phase adjacente à celle de la phase ouverte augmente à chaque fois qu'on élimine une phase où à $t=2s$ prend une valeur de 4,8(A) et à ($t=4s$) la valeur du courant est de 6,8(A), et aussi on remarque une légère augmentation de courant rotorique.

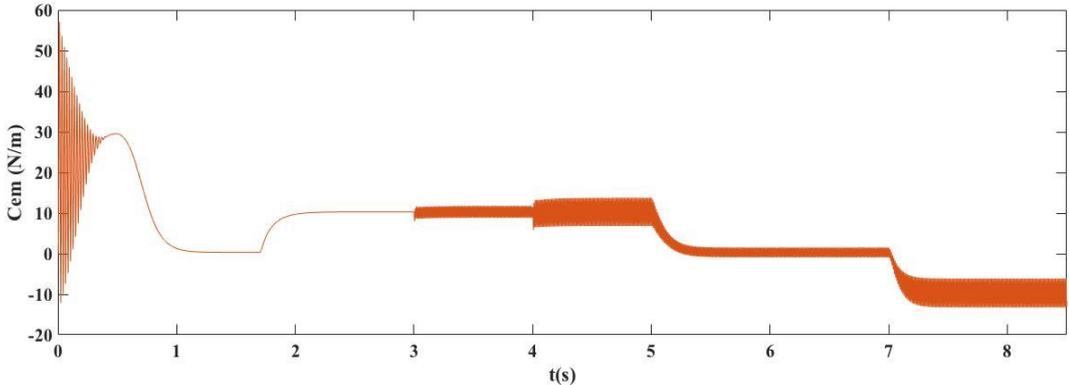


Figure III.7 Couple électromagnétique

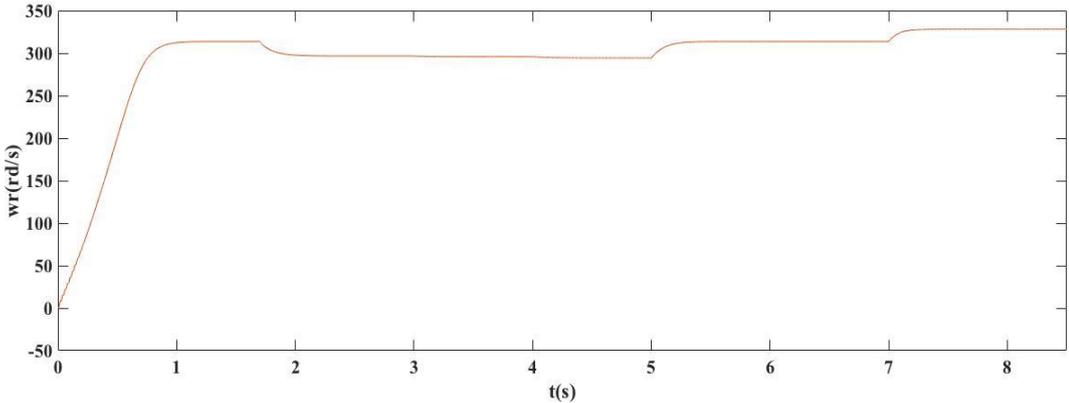


Figure III.8 Vitesse de rotation

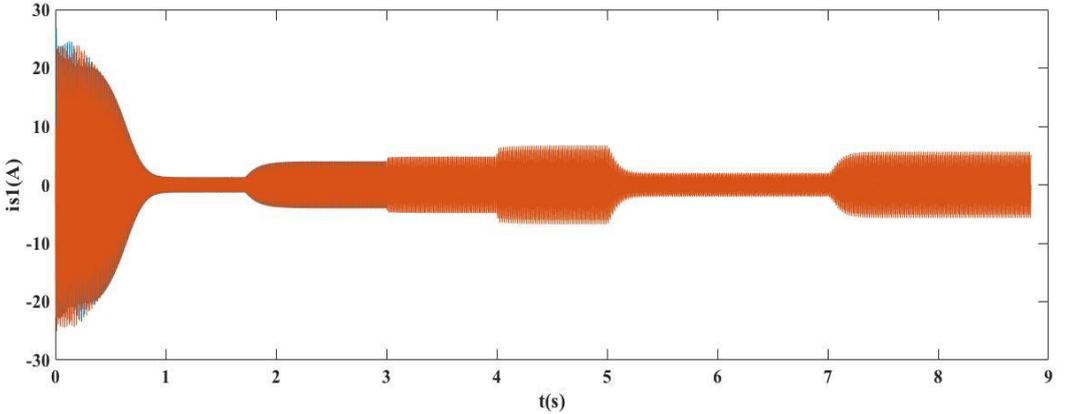


Figure III.9 Courants statorique de la première étoile

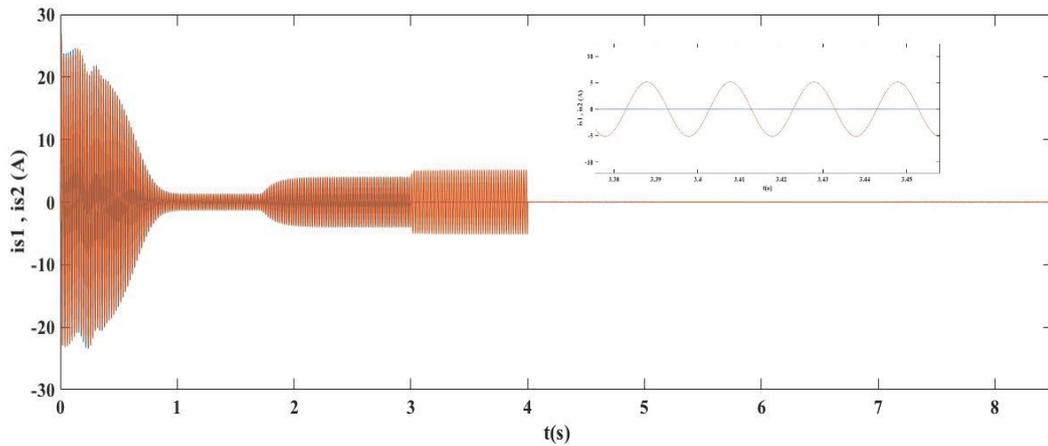


Figure III.10 Courants statoriques de la première phase des deux étoiles

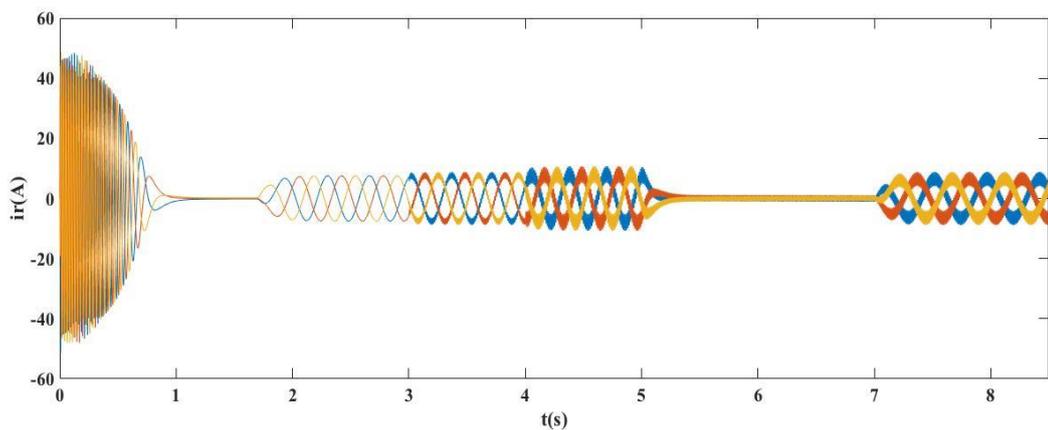


Figure III.11 Courants rotoriques

On a utilisé le POWERGUI pour illustrer différentes THD citées ci-dessous :

Selon la figure (III.12), la valeur du fondamental est de 3.865 et celle de taux de distorsion harmonique (THD) est de 0.71%. Dès que nous avons ouvert une phase, le THD augmente à une valeur de 8.95%. De plus, quand nous procédons à une ouverture de deux phases adjacentes le THD augmente encore plus à une valeur de 11.84%.

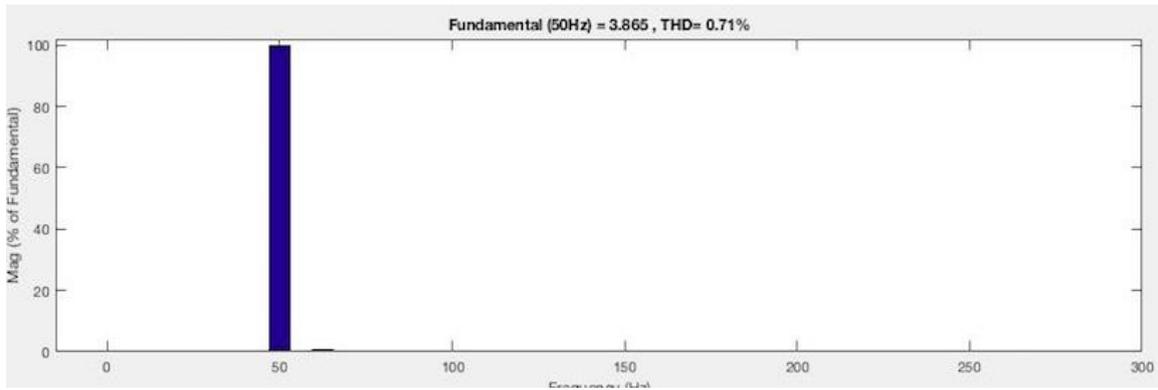


Figure III.12 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente (aucun défaut)

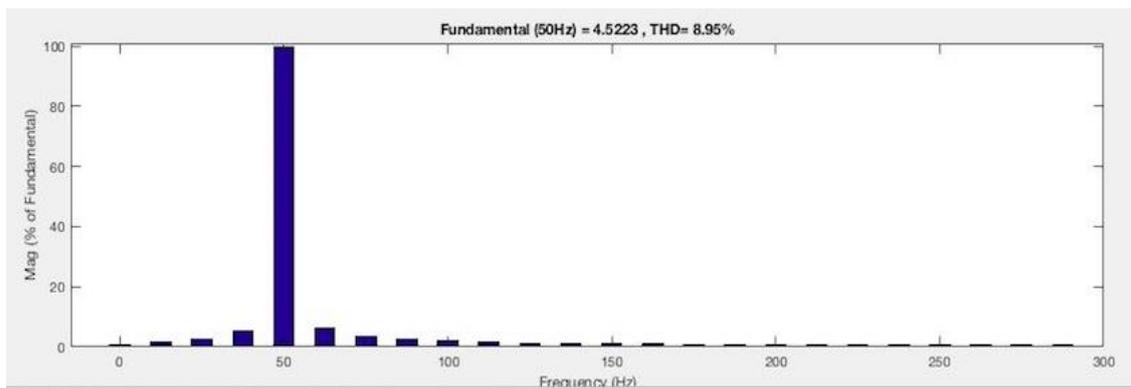


Figure III.13 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase

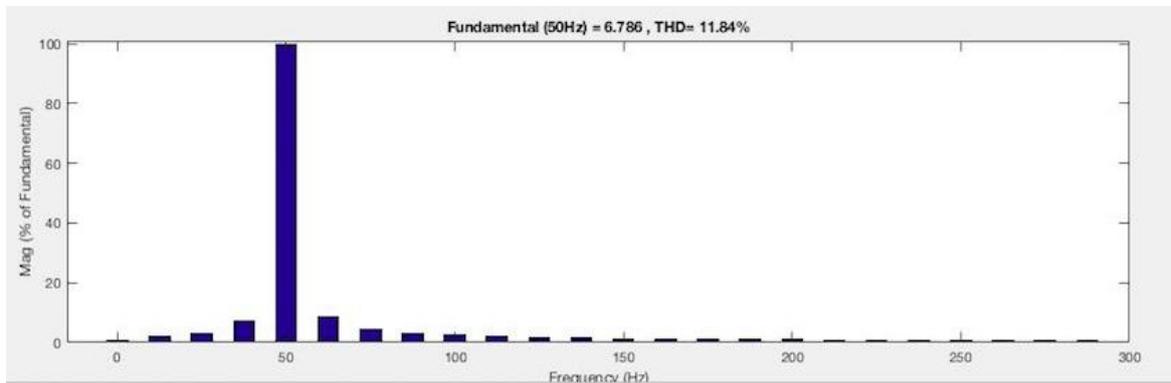


Figure III.14 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l'ouverture d'une phase suivie d'ouverture d'une phase adjacente

III.4.1.2 Ouverture de deux phases non adjacentes

L'étude de ce cas est mise en œuvre, pour voir le comportement de la machine double étoiles lors d'un défaut d'ouvertures des deux phases non adjacentes comme illustré sur la figure (III.15).

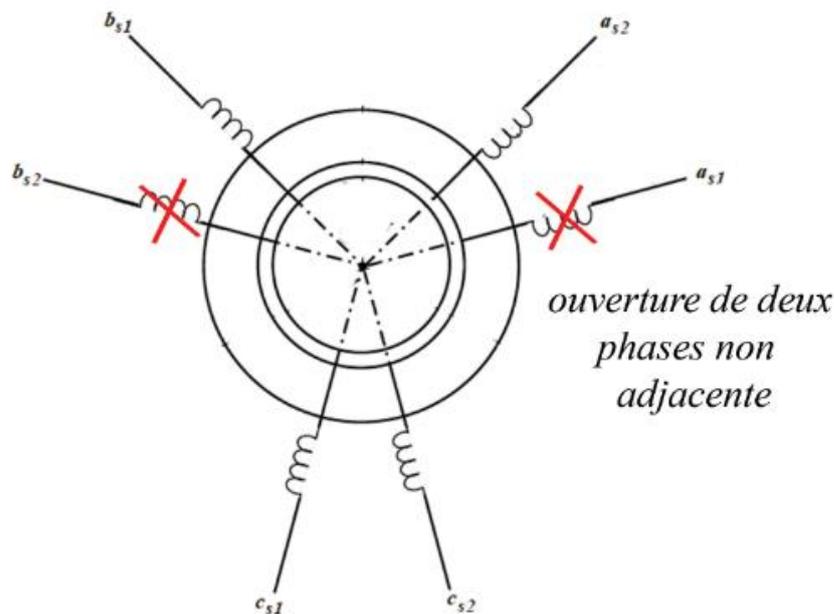


Figure III.15 Machine double étoiles lors de l'ouverture des deux phases non adjacentes

Les figures (III.16-III.20) présentent les résultats de simulation d'un démarrage de la MSADE en mode saine puis on effectue une ouverture de deux phases non adjacentes à l'instant $t=2.5(s)$.

A $t= 2.5(s)$ (ouverture de deux phases non adjacentes) provoque des ondulations de couple de

$$\Delta_{Cem} = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\text{moy}}} = \frac{13.72 - 4.36}{13.05} = 71\% \text{ suivie d'une chute de vitesse à une valeur de } 293$$

(rd/s) représenté dans les figures (III.16 et III.17) respectivement. Où cela provoque aussi une augmentation des valeurs des courants statoriques dans les phases adjacentes aux phases déconnectées du 3.8(A) au 6.5(A) et suivie d'une légère augmentation des courants rotoriques, comme montré dans les figures (III.18- III.20).

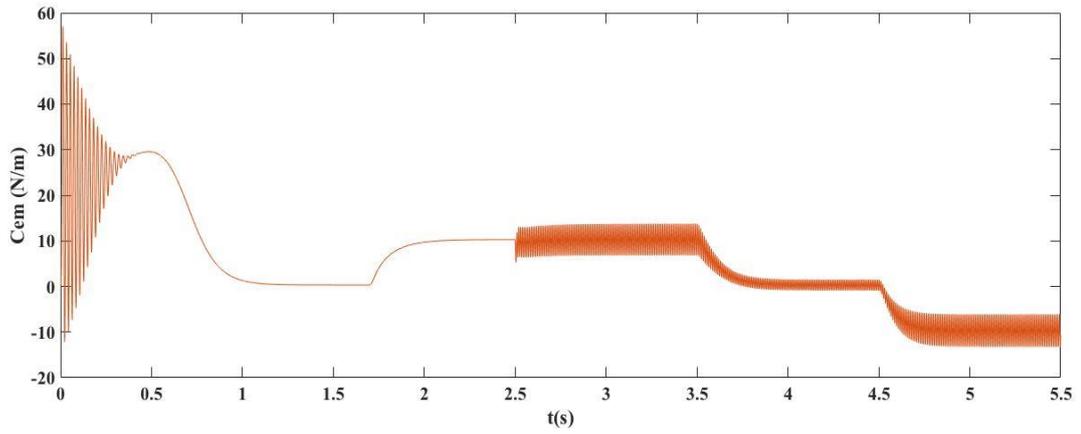


Figure III.16 Couple électromagnétique

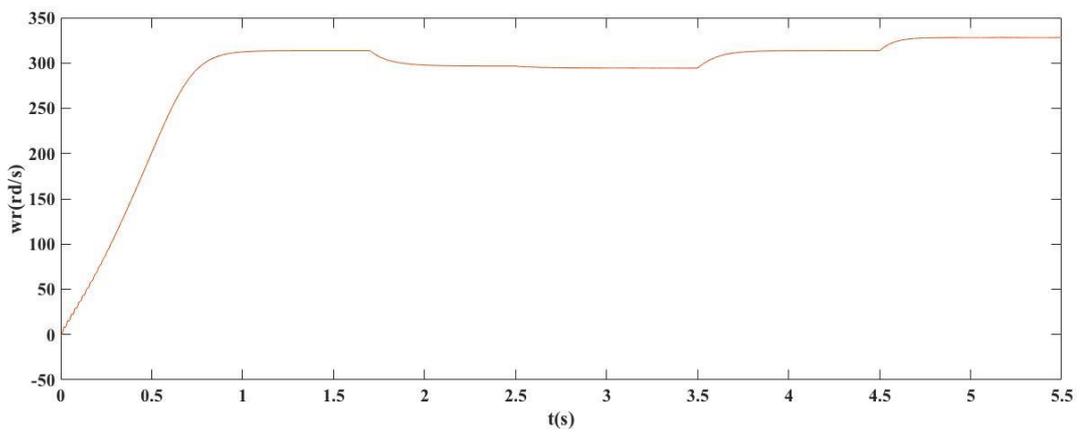


Figure III.17 Vitesse de rotation

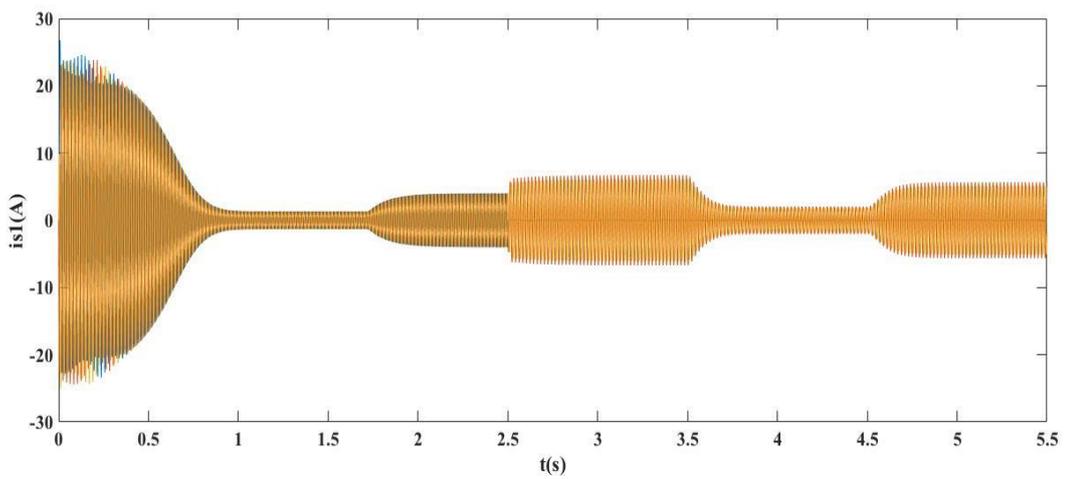


Figure III.18 Courants statorique de la première étoile

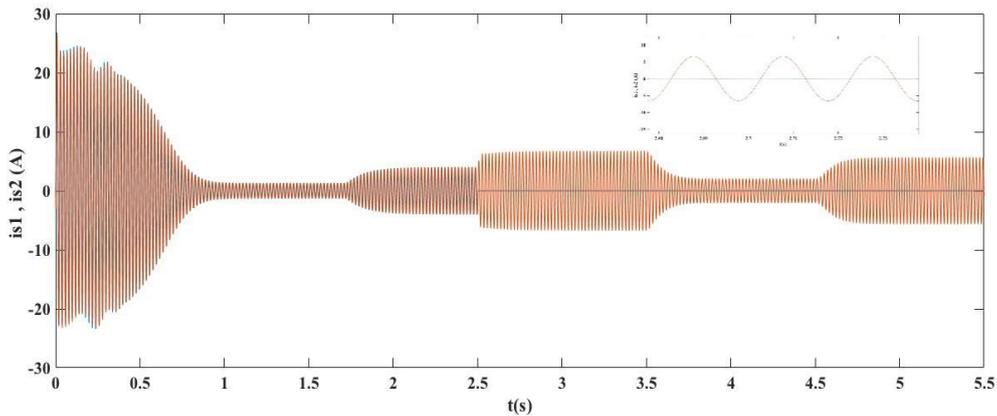


Figure III.19 Courants statoriques de la première phase des deux étoiles

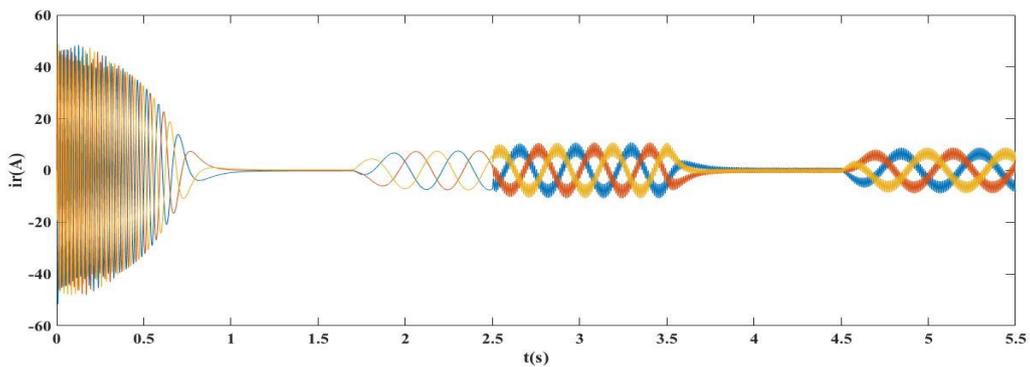


Figure III.20 Courants rotoriques

A la vue de la figure (III.21), nous constatons que les valeurs de fondamental et de THD sont 7.526 et 15.13% respectivement dans le cas où nous avons ouvert deux phases non adjacentes et nous remarquons que la valeur de THD lors de l’ouverture de deux phases non adjacentes est plus important que celle en ouverture de deux phases adjacentes.

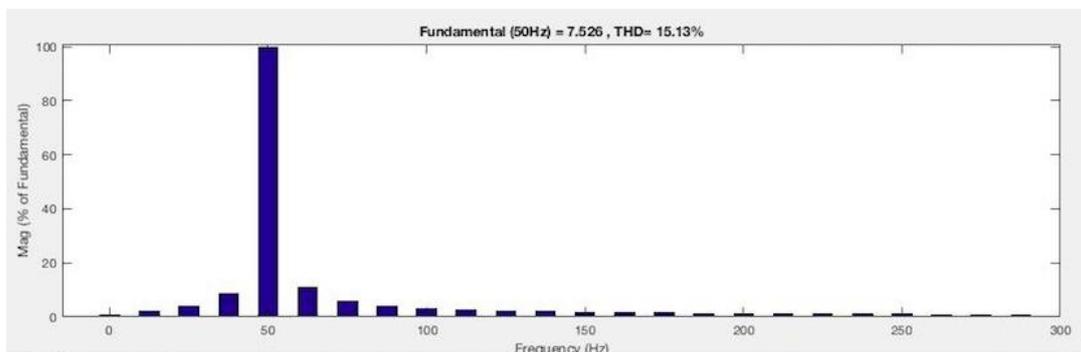


Figure III.21 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de l’ouverture de deux phases non adjacentes

III.4.1.3 Élimination d'une étoile

Cette simulation est mise en œuvre, pour voir le comportement de la machine double étoiles lors d'élimination d'une étoile comme illustré sur la Figure III.22.

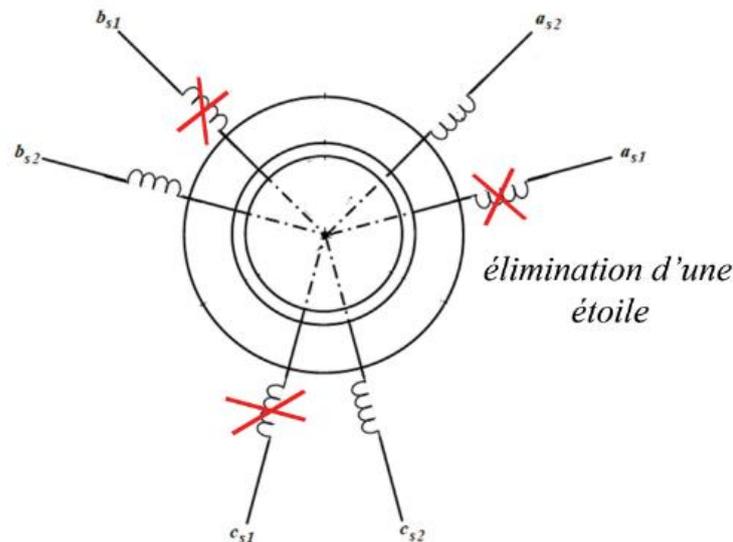


Figure III.22 Machine double étoiles lors d'élimination d'une étoile

Les figures (III.23-III.27) présentes les résultats de simulation d'un démarrage de la MSADE en mode saine puis on effectue une élimination d'une étoile complète à l'instant $t=3(s)$.

A $t= 2.5(s)$ (élimination d'étoile1) provoque une perturbation sur le couple mais dans quelques secondes il va se stabiliser et revenir à l'état initial suivi de même pour la vitesse de rotation représenté dans les figures (III.23 et III.24) respectivement. Le courant de la première étoile est nul vu qu'on élimine la première étoile et les courants de la deuxième étoile augmente presque de double passant de la valeur de 4(A) à la valeur de 8.5(A) pour compenser l'absence de courant dans la première étoile et suivie d'une légère augmentation des courants statoriques, comme montré dans les figures (III.25, III.26 et III.27).

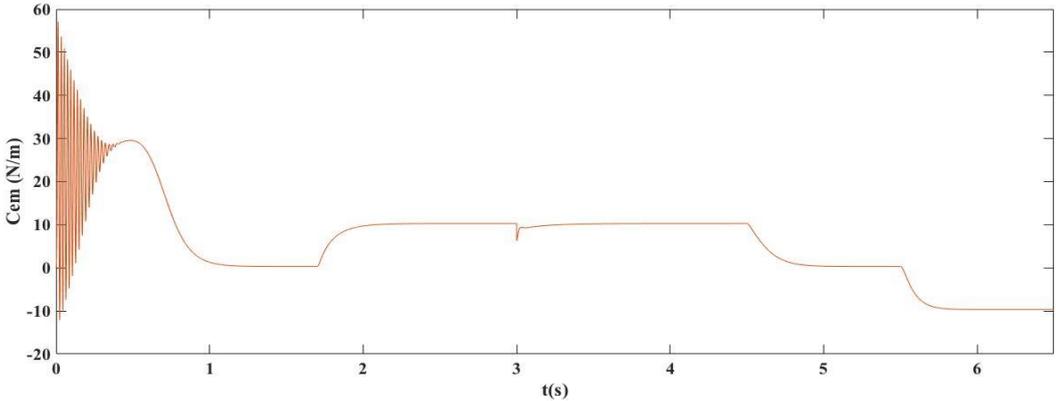


Figure III.23 Couple électromagnétique

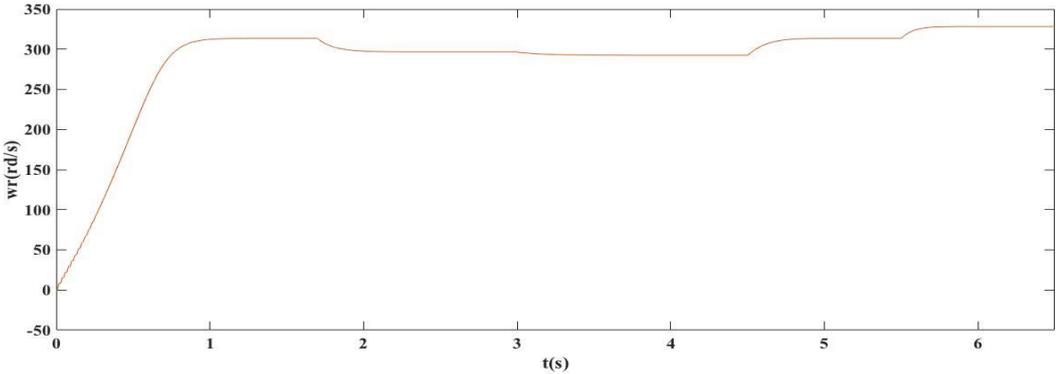


Figure III.24 Vitesse de rotation

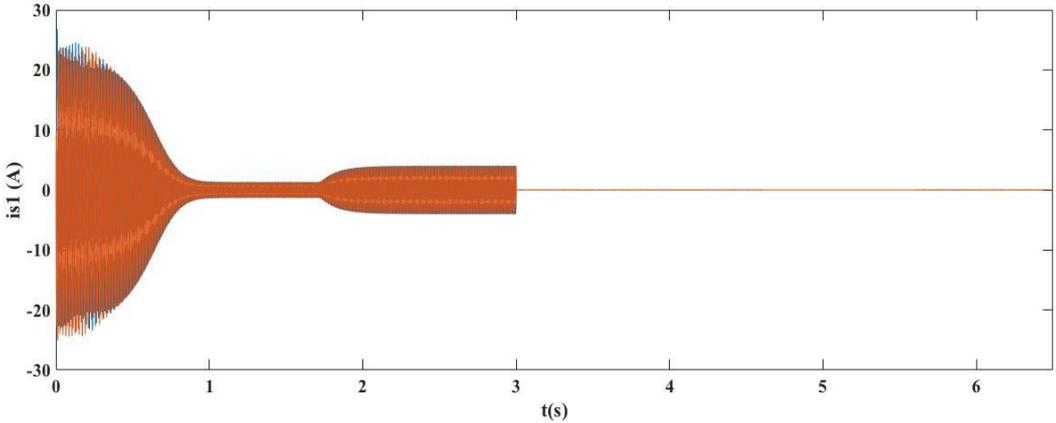


Figure III.25 Courants statorique de la première étoile

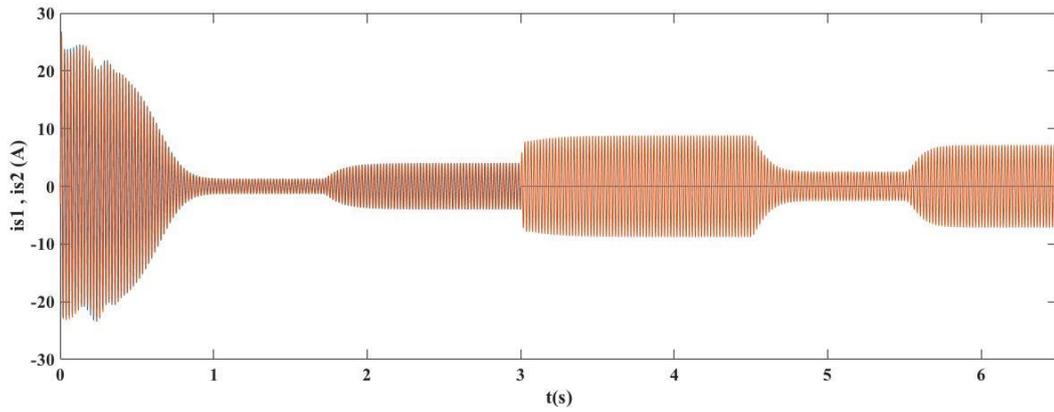


Figure III.26 Courants statorique de la première phase des deux étoiles

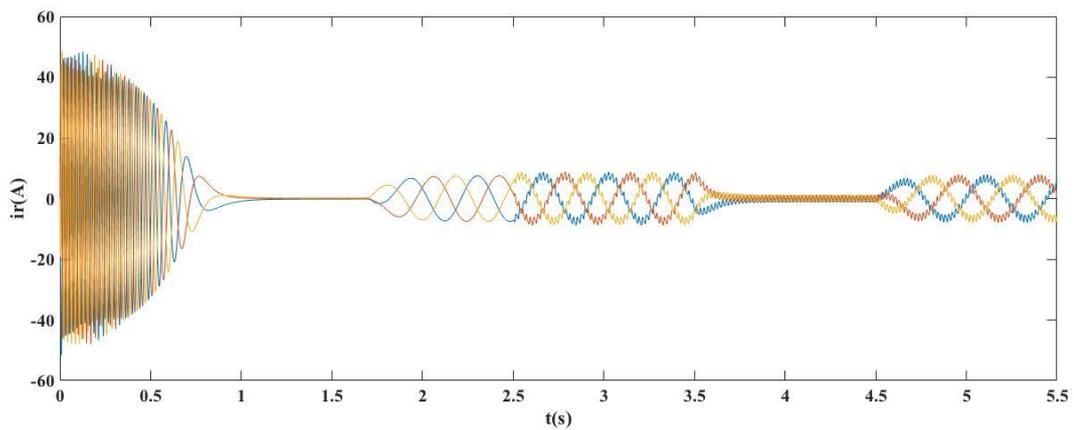


Figure III.27 Courants rotoriques

A la vue de la figure (III.28), nous constatons que les valeurs de fondamental et de THD sont 0.01094 et 33.03% respectivement dans le cas où nous avons éliminé une étoile complète nous remarquons que le taux distorsion harmonique a beaucoup augmenté et le fondamental est trop faible.

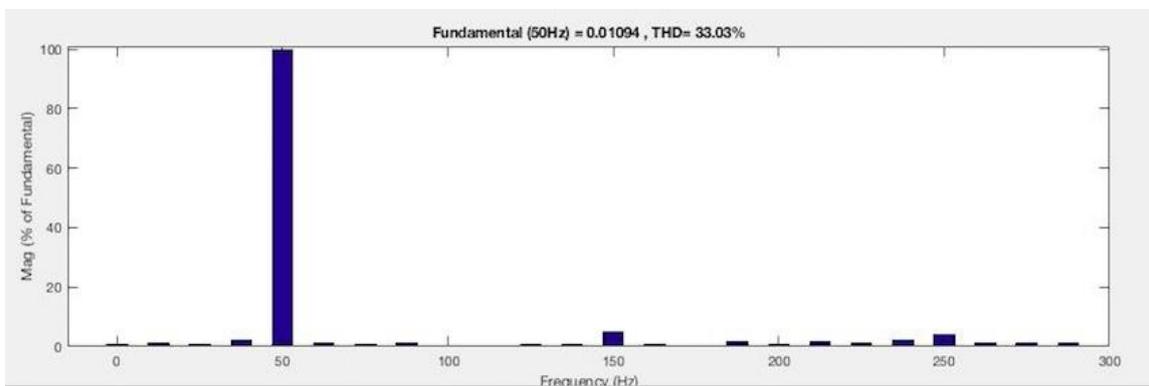


Figure III.28 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors d'élimination d'une étoile.

III.4.1.4 Court-circuit d'une phase statorique

Le court-circuit des spires est donc le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator, même si les risques d'ouverture de phase (conducteur coupé) demeurent physiquement réalisables. Si une partie du bobinage statorique est court-circuitée, le modèle de la machine sera établi de la manière suivante :

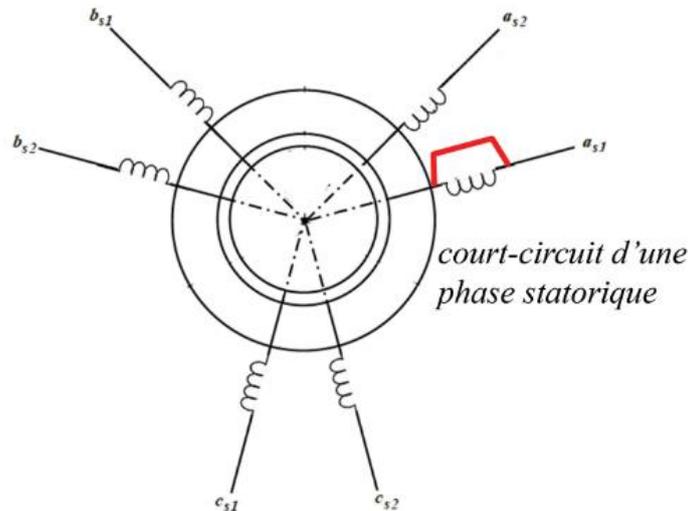


Figure III.29 Machine double étoile lors d'un court-circuit d'une phase statorique

Les figures (III.30-III.33) présentent les résultats de simulation d'un démarrage de la MSADE en mode saine puis on effectue un court-circuit d'une phase à l'instant $t=2.5(s)$.

A $t=2.5(s)$ (court-circuit d'une phase) provoque des ondulations de couple de

$$\Delta_{C_{em}} = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{moy}} = \frac{12.08 - 8.38}{13.05} = 28\% \text{ suivie d'une diminution de la vitesse à une valeur de}$$

296 (rd/s) représenté dans les figures (III.30, III.31) respectivement. Où cela provoque aussi une augmentation de la valeur des courants statoriques dans la phase où on a appliqué le court-circuit (3.8(A) à 8,7(A)) et suivie d'une légère augmentation des courants statoriques, comme montré dans les figures (III.32 et III.33).

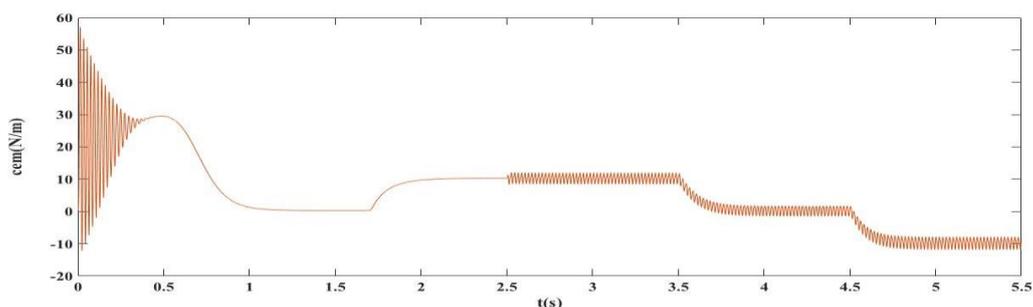
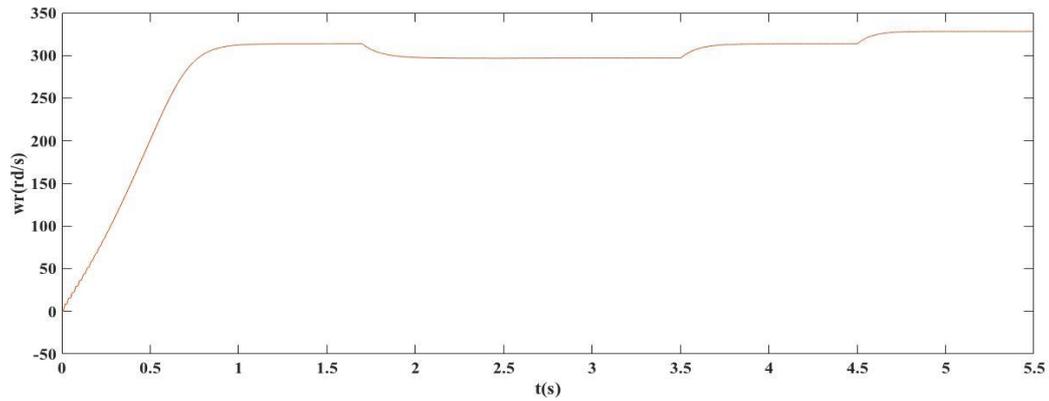
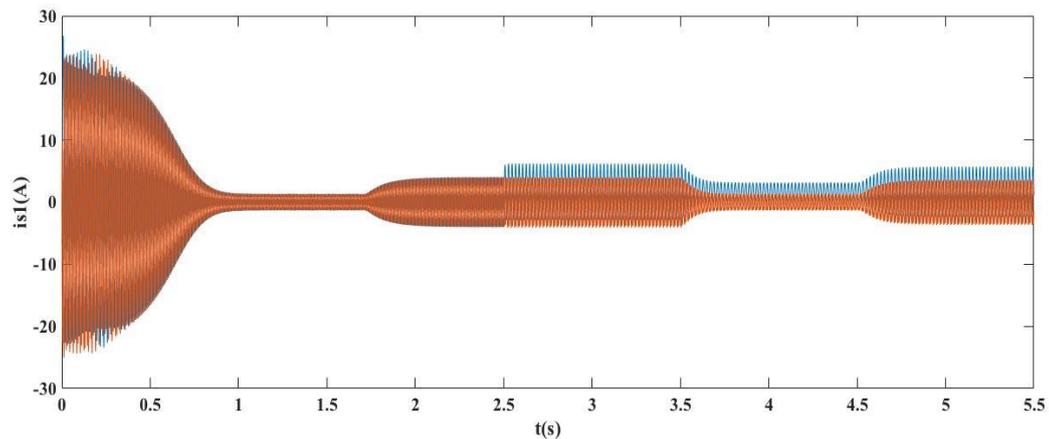
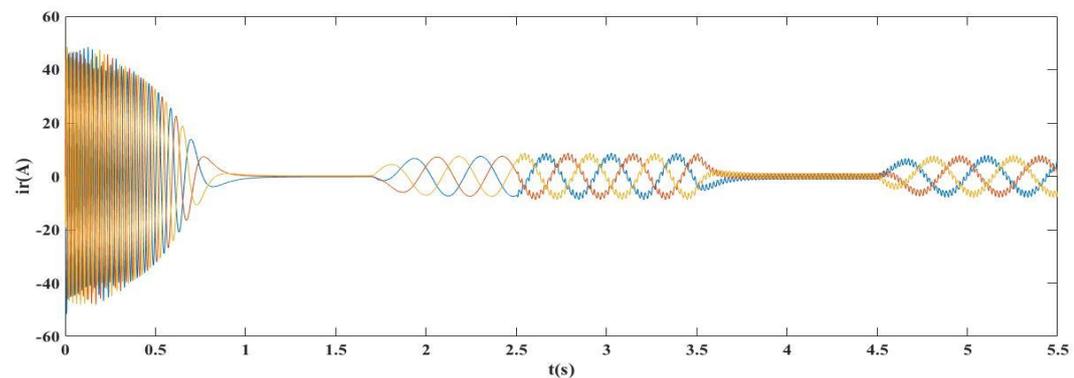


Figure III.30 Couple électromagnétique

**Figure III.31** Vitesse de rotation**Figure III.32** Courants statoriques de la première étoile**Figure III.33** Courants rotoriques

D'après la figure (III.34) nous constatons que la valeur du fondamental est de 4.51 et celle de taux de distorsion harmonique (THD) est de 0.18%, et on remarque aussi l'apparition de la composante continue lors de l'ouverture d'une phase.

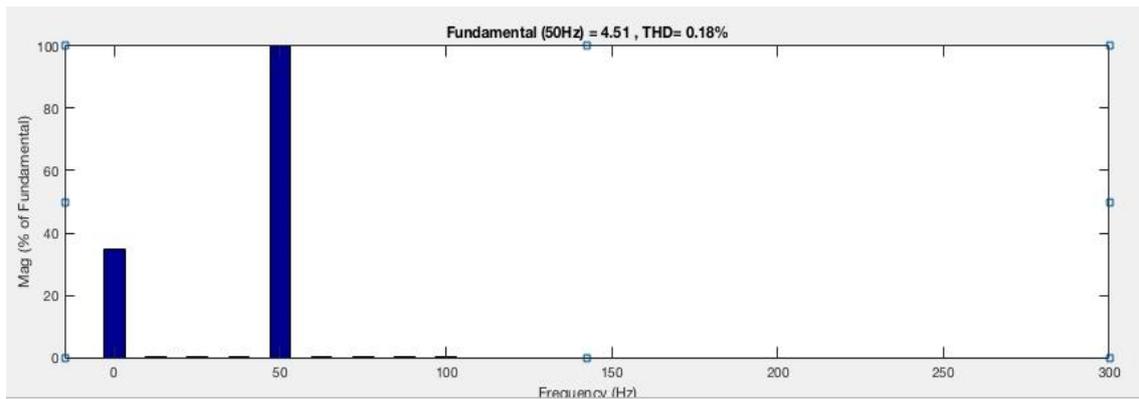


Figure III.34 Taux de distorsion harmonique et du fondamental lors de court-circuit d'une phase.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le cas de fonctionnement de la MASDE en mode dégradé, lors de la présence d'un défaut de types de court-circuit d'une phase statoriques et l'ouverture d'une ou de plusieurs phases statoriques. Les modèles de la machine en défaut sont présentés permettant ainsi d'effectuer des simulations. Les résultats de l'analyse sont examinés et des conclusions sont tirées.

Une ouverture d'une ou plusieurs phases provoque toujours des ondulations de couple et une diminution de la vitesse rotorique, et ces derniers se multiplient en ouvrant plus de phases, et les ondulations du couple sont plus importantes lorsqu'on ouvre des phases non adjacentes comparant si on ouvre des phases adjacentes.

L'élimination d'une étoile ne conduit pas à des ondulations du couple n'est des diminutions de vitesse rotorique, en revanche les courants de la deuxième étoile se double et cela, pour compenser ceux de la première étoile.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude et la modélisation de la machine asynchrone double étoile dans le repère abc en mode normale et dégradé.

Dans le premier chapitre, nous avons mené un état de l'art des ouvrages et publications de référence dans le domaine de recherche sur les machines multiphasées. Ce qui nous a orientés pour le choix de la machine asynchrone double étoiles. Nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à cage en particulier la MASDE pour l'exploiter dans les domaines de grande puissance fonctionnant en modes normal et dégradé, vue sa fiabilité et sa robustesse. En effet, la MASDE est devenue une solution concurrente à la machine à cage.

Afin de mieux maîtriser la machine, le second chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la MAS et MASDE. Pour cela, on a commencé par la modélisation de la machine directement alimentée par deux sources triphasées et équilibrées dans le repère (d-q), puis une modélisation de la MASDE dans le repère naturel est élaborée, pour terminer on a relevé les résultats de simulation sur Matlab/Simulink. Une comparaison entre les deux modèles est faite, les résultats de simulation sont satisfaisants.

Dans le troisième chapitre, nous avons entamé l'étude et l'analyse de fonctionnement de la machine en présence d'un défaut. Nous nous sommes intéressés aux défauts de types court-circuit de spires statoriques et ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques. Le modèle de la machine en défaut est présenté permettant ainsi d'effectuer des simulations. Les résultats de l'analyse sont examinés et des conclusions sont tirées. D'après les résultats obtenus, une ouverture d'une ou plusieurs phases provoque toujours des ondulations de couple et une diminution de la vitesse rotoriques, les ondulations du couple sont plus importantes lorsqu'on ouvre des phases non adjacentes et l'élimination d'une étoile ne conduit pas à des ondulations du couple n'est des diminutions de vitesse rotoriques, en revanche les courants de la deuxième étoile se double et cela, pour compenser ceux de la première étoile.

Le travail développé dans le cadre de ce mémoire ouvre des voies multiples d'améliorations que l'on peut indiquer comme suit : Alimentation de la machine par des convertisseurs statiques, une validation par moyens expérimentaux du système étudié est envisageable et un prototype de laboratoire sera utile pour valider la topologie et le système de commande proposé.

Annexes

Paramètre

1. Paramètre de la MAS

Les paramètres de la MAS sont donnés par le tableau (T.2)

Puissance nominale	$P_n = 15kW$
Tension nominale	$v_n = 220V$
Fréquence	$f_s = 50Hz$
Résistance d'une phase statorique	$r_1 = 0.21\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$r_r = 0.22\Omega$
Inductance de fuite d'une phase	$L_f = 0.001H$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.043H$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.0042H$
Nombre de paires de pôles	$P = 2$
Moment d'inertie de l'arbre	$J = 1kg.m^2$

TAB 1- Paramètre de la MAS

2. Paramètre de la MASDE

Les paramètres de la MASDE sont donnés par le tableau (T.1)

Puissance nominale	$P_n = 4.5kW$
Tension nominale	$v_n = 220V$
Fréquence	$f_s = 50Hz$
Résistance d'une phase statorique (étoile 1 et 2)	$r_1 = r_2 = 3.72\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$r_r = 2.12\Omega$
Inductance de fuite d'une phase (étoile 1 et 2)	$L_1 = L_2 = 0.022H$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.006H$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.3672H$
Nombre de paires de pôles	$P = 1$
Moment d'inertie	$J = 0.0625kg.m^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.001N.m.s / rd$

TAB 1- Paramètre de la MASDE

bibliographie

- [HAD01] D. Hadiouche, Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : Modélisation, alimentation et structure, Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, France, décembre 2001.
- [CHE08] S. Chekkal, K. Hamitouche, Etude, Identification, Modélisation et commande de la Machine Asynchrone Double Etoile, mémoire de fin d'études de l'université de Bejaia, 2008.
- [AMI08] H. Amimeur, Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement, Mémoire de Magister de l'université de Batna, Algérie, 2008.
- [IFF16] 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.
- [RIV13] D. Rivelino et *al.* « Fault diagnosis scheme for open-circuit faults in field-oriented control induction motor drives », IET Power Electronics, vol. 6, no. 5, p. 869-877, 2013.
- [LIU93] T.-H. Liu et T. Lipo, « A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, p. 910-918, sept. 1993.
- [ALB12] L. Alberti et N. Bianchi, « Experimental tests of dual three-phase induction motor under faulty operating condition », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 5, p. 2041-2048, 2012.
- [CIT14] H. S. Che, E. Levi, M. Jones, W.-P. Hew et N. Abd.Rahim, « Current control methods for an asymmetrical six-phase induction motor drive », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, p. 407-417, jan. 2014.
- [CHE15] S. Chekkal, Intégration des Génératrices Asynchrones à Double Etoiles dans un Système Eolien, Thèse Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie 2015.
- [BER16] F.Berrabah, Commande sans capteur de la machine asynchrone, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algerie 2016
- [Springer] induction Motor fault Diagnosis : Approach through Current signature Analysis Karmakar, S ; Chattopadhyay, S ; Mitra, M ; Gupta S. 2016, XXV, 161 p.106 illus., 72 illus. In color., Hardcover
- [MER13] E.Merrabet, Amélioration des Performances de Régulation d'une Machine Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle, thèse doctorat, Université Hadj Lekhdar Batna Algérie, 2013.
- [Site1] [https : //fr.m.wikipedia.org /wiki/machine-asynchrone.](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/machine-asynchrone)

bibliographie

[MEH, MEO17] H. Mehenni, A. Mouhoub, Commande D'une Machine Asynchrone Pentaphasée Alimentée Par Un Convertisseur Matriciel Indirect, Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, Algérie, 2017.

[LAK14] M. LAKHDARI, Simulation Et Commande De La Machine Asynchrone Double Etoile Pour Aerogeneration, Mémoire de Magister, Université de Farhat Abbas Sétif, Algérie, 2014.

[LYR02] R. LYRA et T. LIPO, « Six-phase induction machine with third harmonic current injection », Proc. Electrimacs.[Links], 2002.

[MAO15] Y. MAOUCHE, Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile. Application à la sureté de fonctionnement, Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine, Algérie,2015

[ADJ12] A. ADJATI, Etude Des Machines Asynchrones A Double Etoile En Pompage, Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2012.

Introduction générale

Conclusion générale

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre III