

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option :
Machines Electriques

Thème

**Analyse des performances d'une machine asynchrone
double étoile en fonctionnement autonome, en régime
normal et dégradé**

Réalisé par :

Mr SLIMANI Faouzi

Mr BOULEKBACHE Yanis

Membres du jury :

Président : Mr TAZRART Farid

Promoteur : Mm CHEKKAL Samira

Co-Promoteur : Mr KHALDI Lyes

Examineur : Mr AMIMEUR Hocine

Promotion 2021

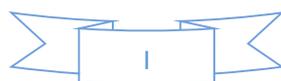
REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la santé et la volonté d'entamer ce mémoire.

*Nous tenons d'abord à remercier infiniment notre promotrice, Madame « **CHEKKAL Samira** », et notre Co-promoteur Monsieur « **KHALDI Lyes** » pour leurs encadrements et leurs constantes orientations de notre recherche en y accordant une méticuleuse attention, ainsi que pour leurs judicieux conseils, concernant l'aspect rédactionnel, qui ont contribué à alimenter notre réflexion, leurs disponibilités et leurs extrêmes amabilités malgré leurs grandes charges de travail.*

On tient à remercier aussi le président de jury Monsieur « ... » Pour son soutien et sa bienveillance et tous ses conseils qui nous ont encore aidés, aussi que Monsieur « ... » Pour avoir accepté de traiter et d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont permis que ce travail voie le jour de près ou de loin. Qu'elles soient rassurées de notre profonde reconnaissance.



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents, qui sont la source de lumière qui m'éclaire
depuis ma naissance*

*Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes les étapes de
ma vie.*

*Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles gratitudees
pour son attention et son soutien*

A mes chers frères : Farid, Yacine et Nacer-eddine.

A mes très précieux grands-parents, et toute ma famille.

*A mes ami(e)s (Zaki et Amine.B, Nadji.M, Yanis.Bouhamouche,
Lghazi, Zinou, Massi, Bislam, Amiroche, lamine, Badis, Youba, La3la,
Toufik,..., L, H, D, W, K, A, M, S..., et tous les résidents de la
R.U.Iryahen).*

A mon binôme.



DEDICACES

Avec une pensée profonde que je dédie ce travail

*A mes très chers parents qui m'ont vivement soutenu et encouragé
tout au long de mon parcours d'études et toute ma vie.*

*Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes les étapes de
ma vie.*

*Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles gratitude
pour son attention et son soutien.*

A mes très précieux grands-parents, et toute ma famille.

A mes chers sœurs et frères.

A ma grand-mère que j'aime.

A mon grand-père que j'aime.

A mon binôme.



Table des matières

REMERCIEMENT	I
DEDICACES.....	II
DEDICACES.....	III
Table des figures	VI
Table des Tableaux.....	VII
Nomenclature	IX
Abréviations	XIII
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes autonomes.....	3
Introduction	3
I.1 Différentes chaînes de conversion d'énergie électrique.....	4
I.1.1 Définition d'un système autonome	4
I.1.2. Système photovoltaïque autonome	4
I.1.3 Système éolien autonome.....	5
I.1.4 Système hydraulique autonome	6
I.2 Machines utilisées pour les systèmes autonomes.....	7
I.2.1 Machines synchrones	7
I.2.2 Machines asynchrones	8
I.2.3 Machines multi-phasés.....	10
I.2.4 Applications des machines multi-phasés.....	11
Conclusion.....	13
Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone double étoile	15
Introduction	15
II.2 Modélisation de la MASDE.....	16
□ Hypothèses Simplificatrices d'Etude	16
II.3 Modèle biphasé de la MASDE selon le système d'axes d, q.....	19
II.3.1 Transformation de Park	19
Equation mécanique	23
II.4 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes d, q	24
II.5 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande M.L.I.....	28
II.5.1 Modélisation de l'onduleur	28
II.5.2 Commande par modulation sinus-triangle	30
II.5.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	31

II.6 Simulation et interprétation des résultats	31
Conclusion.....	36
Chapitre III : Contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome.....	37
Introduction	37
III.1 Commande vectorielle.....	37
III.1.1 Principe de la commande vectorielle.....	37
III.1.2 Choix d'orientation du flux	37
III.1.3 Différentes méthodes de la commande vectorielle.....	38
III.2 Application de la commande vectorielle pour la GASDE en fonctionnement autonome	43
III.3 Modélisation de la charge.....	44
III.3.1 Charge purement résistive	44
III.4 Simulation et interprétation des résultats	45
Conclusion.....	48
Chapitre IV : Analyse des performances de la GASDE en mode dégradé.....	49
Introduction	49
IV.1 Présentation des différents défauts d'une chaîne de production multiphasée	49
IV.1.1 Défaillance au niveau de la machine.....	50
IV.1.2 Défaillances au niveau du convertisseur de puissance	52
IV.1.3 Défaillance au niveau des capteurs	53
IV.1.4 Comportement de la MASDE en mode dégradé	53
IV.2 Simulation et interprétation des résultats	56
Conclusion.....	59
Conclusion générale	60
ANNEXES	61
BIBLIOGRAPHIE	62
Résumé.....	66

Table des figures

Fig I. 1 : Structure d'un système autonome connecté à une charge	4
Fig I. 2 : Schéma simplifié d'un système PV autonome	5
Fig I. 3 : Système éolien en fonctionnement autonome.....	6
Fig I. 4 : centrale de production d'électricité.....	6
Fig I. 5 : Machine synchrone à rotor bobiné.....	7
Fig I. 6 : Machine synchrone à aimants permanents	8
Fig I. 7 : Machine asynchrone à cage	9
Fig I. 8 : Machine asynchrone a rotor bobiné.....	9
Fig I. 9: Structure en cascade de deux machines asynchrones.....	10
Fig I. 10 : MASDE autonome connecté à une éolienne	12
Fig II. 1 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile [28] .	15
Fig II. 2 : Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes (d,q) [37]	20
Fig II. 3 : Schéma électrique équivalent.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig II. 4 : Schéma bloc global de simulation de la MASDE en (d, q).....	24
Fig II. 5 : Couple électromagnétique.....	26
Fig II. 6 : Vitesse de rotation rotorique	26
Fig II. 7: <i>Courants rotoriques</i>	26
Fig II. 8 : Courants statoriques direct et en quadrature de l'étoile 1	27
Fig II. 9: Courants statoriques direct et en quadrature de l'étoile 2	27
Fig II. 10: Courants rotoriques direct et en quadrature	27
Fig II. 11 : Courants statoriques de la première phase des deux étoiles.....	28
Fig II. 12 : Zoom des courants statoriques de la première phase des deux étoiles.....	28
Fig II. 13 : Onduleur à commande MLI triphasé	29
Fig II. 14: Schéma MASDE-convertisseur de tension à commande MLI.....	31
Fig II. 15: Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par un onduleur M.L.I	31
Fig II. 16: Signal de porteuse et tension de référence	32
Fig II. 17 : Signal de commande des interrupteurs d'onduleur.....	33
Fig II. 18 : Tension de sortie d'onduleur et le courant de la première phase de la première étoile.....	33
Fig II. 19 : Zoom sur la tension de sortie d'onduleur et le de courant de la première phase de la première étoile.....	33
Fig II. 20: Couple électromagnétique.....	34
Fig II. 21 : Vitesse de rotation rotorique	34
Fig II. 22 : Courants rotoriques	34
Fig II. 23: Zoom sur les courants rotoriques	35
Fig II. 24 : Courants statoriques de la première étoile	35
Fig II. 25 : Courants statoriques de la deuxième étoile.....	35
Fig III. 1: Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC).....	39

Fig III. 2 : Schéma de principe du defluxage [35]	41
Fig III. 3 : Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse [35].....	42
Fig III. 4 : Boucle de régulation de vitesse [35].....	42
Fig III. 5 : Schéma bloc de découplage en tension [35].....	43
Fig III. 6 : Schéma du principe de la commande vectorielle à flux orienté appliqué à la GASDE en fonctionnement autonome [42]	44
Fig III. 7 : Schéma représentatif de connexion de la charge selon l'axe de l'étoile 1	44
Fig III. 8 : Vitesse d'entraînement	46
Fig III. 9 : Allure de la tension du bus continu	46
Fig III. 10 : Allure de la puissance électromagnétique	46
Fig III. 11 : Allure du couple électromagnétique	47
Fig III. 12 : Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1	47
Fig III. 13 : Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1	47
Fig III. 14 : Allure des courants statoriques des deux étoiles	48
Fig III. 15 : Allure des courants statoriques des deux étoiles	48
Fig IV. 1 : Différents défauts susceptible dans un système d'entraînement.....	50
Fig IV. 2 : Illustration des différents défauts statorique de la machine asynchrone.....	51
Fig IV. 3 : Répartition des défaillances dans les convertisseurs de puissance	52
Fig IV. 4 : Différents types de défaut d'un bras d'onduleur de tension	53
Fig IV. 5 : Couple électromagnétique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phase.....	57
Fig IV. 6 : Vitesse mécanique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases	57
Fig IV. 7 : Rendement de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases	57
Fig IV. 8 : pertes Joule statorique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases	58
Fig IV. 9 : Courant statorique de la MASDE lors défauts d'ouverture d'une phase statorique	58
Fig IV. 10 : Courant statorique de la MASDE lors défauts d'ouverture de deux phase statoriques.....	58

Table des Tableaux

Tableau IV. 1 : Principaux défauts au niveau des machines électriques	50
--	----

Nomenclature

C

C_p : Coefficient de puissance.

C_{pmax} : Coefficient de puissance maximal

C_{em} : Couple électromagnétique [N.m]

C_{em}^* : Couple électromagnétique de référence [N.m]

C_r : Couple mécanique de la turbine [N.m]

E

E : Tension continue [V]

F

F : Fréquence de la tension de référence [Hz]

F_p : Fréquence de la porteuse [Hz]

F_s : Fréquence du réseau [Hz]

G

G : Gain du multiplicateur de vitesse

g : Glissement de la machine

I

$i_{as1,2}, i_{bs1,2}, i_{cs1,2}$: Courants triphasés statoriques (étoiles 1 et 2) [A]

$i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}$: Courants statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques directes et quadratiques respectivement [A]

$[i_{s1}] [i_{s2}] [i_r]$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques [A]

J

J : Moment d'inertie [kg.m²]

K

K_f : Coefficient de frottement visqueux [Nms/rd]

K_i : Gain intégral

K_p : Gain proportionnel

L

L : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor [H]

L_{ms} : Valeur maximal des coefficients d'inductance mutuelle statorique [H]

L_{mr} : Valeur maximal des coefficients d'inductance mutuelle rotorique [H]

L_{f1}, L_{f2}, L_r : Inductances de fuites d'une phase de l'étoile(1,2) et du rotor [H]

L_{sr} : Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor [H]

$L_{f1} + L_m$: Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 1 [H]

$L_{f2} + L_m$: Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 2 [H]

$L_r + L_m$: Inductance propre cyclique d'une phase rotorique [H]

M

M : Indice de modulation de l'onduleur

N

N : Vitesse de rotation de la machine [tr/mn]

P

P : Nombre de paires de pôles de la GASDE

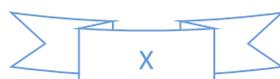
P_g : Puissance actives statoriques totale des deux étoiles [W]

P_{mec} : Puissance mécanique de la GASDE [W]

P_n : Puissance nominale de la génératrice [W]

P_g : Puissance active côté réseau [W]

Q



Q_g : Puissance réactive côté réseau [VAr]

Q_a : Nombre équivalent de phase statorique

R

r_{ds1} : Résistance de défaut statorique de la phase 1 [Ω]

R : Résistance de la ligne [Ω]

r_{s1}, R_{s2}, R_{s3} : Résistances d'une phase statoriques (étoile 1,2) et rotoriques [Ω]

r_t : Résistance du filtre [Ω]

T

T : Temps [s]

T_p : Période de la porteuse [s]

U

$U_{f(t)}$: Tension filtrée appliquée à l'onduleur [V]

V

$V_{a,b,cs,1,2}$: Tensions triphasées statoriques (étoile 1 et 2) [V]

$V_{a,b,cr}$: Tensions triphasées rotoriques [V]

$V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}, V_{dr}, V_{qr}$: Tensions statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques dans le référentiel de Park (d,q) respectivement [V]

V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} : Tension côté réseau électrique [V]

V_{s1}, V_{s2}, V_r : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques [V]

X

[X] : Vecteur d'état

ϕ

$\phi_{a,b,cr}$: Flux triphasés rotoriques [Wb]

$\varphi_{a,b,cs1,2}$: Flux triphasés statoriques (étoile 1 et 2) [Wb]

$\varphi_{ds1}, \phi_{qs1}$: Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]

$\varphi_{ds2}, \phi_{qs2}$: Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]

φ_{dr}, ϕ_{qr} : Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]

φ_n : Flux nominal [Wb]

$[\varphi_r]$: Vecteur flux rotorique [Wb]

$[\varphi_{s1}], [\varphi_{s2}], [\varphi_r]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques [Wb]

θ

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

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

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

θ_{r-a} : Position du rotor par rapport à l'étoile 2 [rd]

η

η_1 : Rendement de l'ensemble machine-convertisseurs statique

Ω

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice [rad/s]

Ω_{mec}^* : Vitesse mécanique de référence [rad/s]

Ω_n : Vitesse mécanique nominale de la machine [rad/s]

ω

ω_{gl} : Pulsation électrique fondamentale du glissement [rd/s]

ω_r : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotorique [rd/s]

ω_s : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statorique et du réseau [rd/s]

α

α : Angle électrique de décalage entre les deux étoiles [°]

Abréviations

FOC : Field Oriented Control (Commande à flux orienté)

GAS : Génératrice Asynchrone à Cage

AEAS : Alimentation électrique autonome stationnaire

GASDE : Génératrice Asynchrone Double Etoile

MASDE : Machine Asynchrone Double Etoile

MCC : Machine à Courant Continu

M.L.I : Modulation par Largeur d'impulsion

AEAS : alimentation électrique autonome stationnaire.

Introduction Générale

Les premières formes d'électricité découvertes par l'homme étaient produites naturellement comme la foudre et la friction. Après la révolution scientifique, l'homme a pu mettre en place des machines simples pour créer de l'électricité [1]. L'électricité est l'une des plus grandes innovations technologiques de l'humanité. Aujourd'hui, elle est devenue la source d'énergie la plus largement utilisée dans de nombreux domaines (les systèmes de transport et de communication, les grandes usines/installations, les équipements modernes et les appareils numériques) [2]. Mais suite à l'augmentation de la population mondiale les scénarios futurs prévoient de fortes consommations des énergies d'origine fossiles, conduisant ainsi à l'épuisement des combustibles fossiles qui est un véritable défi futur pour l'humanité, de plus le changement climatique que connaît la terre est lié au problème d'émission de CO₂ qui à l'origine de la pollution de l'atmosphère [3].

Pour pallier à ces contraintes, il est nécessaire de réfléchir à une nouvelle politique environnementale mondiale avec l'obligation d'une transition énergétique vers des énergies vertes dite renouvelable ou inépuisable, puisque ces énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité sans aucune émission de CO₂ et des gaz polluants, et non seulement ceci, mais c'est une alternative économique intéressante pour fournir de l'électricité notamment aux populations isolées par des systèmes autonomes.

Les systèmes autonomes sont utilisés dans l'alimentation des sites isolés, où un raccordement au réseau est impossible à cause de l'éloignement et des coûts élevés de ce dernier. Ces systèmes sont des unités de production d'électricité généralement de puissance réduite qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution [4].

Les systèmes autonomes utilisent plusieurs types de machines synchrones et asynchrones triphasées très largement utilisées, néanmoins depuis la fin des années 20, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour segmenter la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite eu 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. Par ailleurs, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que : segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, réduction des courants harmoniques et grandes fiabilités [5].

La contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile, en fonctionnement génératrice est l'objectif de notre travail. Où Les différents systèmes autonomes, la modélisation de la machine asynchrone double étoile (MASDE), le contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome et l'analyse des défauts d'ouverture de phases de la MASDE, constituent les quatre chapitres de ce travail de mémoire de fin d'études cités ci-dessous :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur le système autonome où nous avons abordé les différentes chaînes de conversion, les machines utilisées dans ces systèmes particulièrement la machine à double étoile qui est l'objet de notre travail, dont nous avons cité les caractéristiques, les applications ainsi que ses avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre sera destiné à la modélisation de la MASDE. On présentera le modèle de la machine biphasée lors de l'application de la transformation de Park dans le but de réduire la complexité du système et de faciliter sa mise en équation, Ensuite étudiera le comportement de la MASDE lors de l'alimentation par onduleur de tension à commande MLI, enfin on commentera les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'étude et le contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome, on présentera les différentes méthodes de la commande vectorielle et l'influence des paramètres du régulateur de vitesse, ensuite on déterminera l'influence de la charge purement résistive sur la performance de la GASDE, Enfin nous présenterons les résultats de simulation.

Le quatrième chapitre sera dédié à l'étude des machines multiphasées en fonctionnement dégradé, on commensera par présente des différents défauts dans un système de production d'énergie électrique puis nous allons étudier le comportement du système de production en fonctionnement autonome en présence de défaut d'ouverture de phase statorique, Enfin nous allons exposer les résultats de simulation.

Enfin on clôtura ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes autonomes

Introduction

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques.

Ces générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en contenu d'énergie [8].

En effet, dans le cas de petites communautés vivant dans des zones isolées difficiles d'accès (montagnes, îles, déserts, camps itinérants, etc.) la construction de lignes électriques permettant la connexion au réseau entraînent un surcoût très important et une alimentation électrique autonome stationnaire (AEAS) est très souvent préférée. Lorsqu'une AEAS utilise des sources d'énergies comme le photovoltaïque ou l'éolien, elle doit nécessairement utiliser un système de stockage d'énergie, comme par exemple des batteries, afin d'alimenter la charge lorsque les sources reproduisent pas suffisamment d'énergie. Une AEAS peut également être constituée d'un générateur auxiliaire qui permet d'alimenter la charge même lorsque les batteries sont vides. Cependant, de par la nature intermittente des sources renouvelables, le dimensionnement de l'installation s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des caractéristiques météorologiques du lieu où le système est installé et également du profil de consommation.

I.1 Différentes chaînes de conversion d'énergie électrique

I.1.1 Définition d'un système autonome

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petit tailles qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution. Ils peuvent être composés d'un générateur diesel, d'un générateur photovoltaïque, centrale nucléaire autonome, centrale hydraulique autonome et éolien [9].

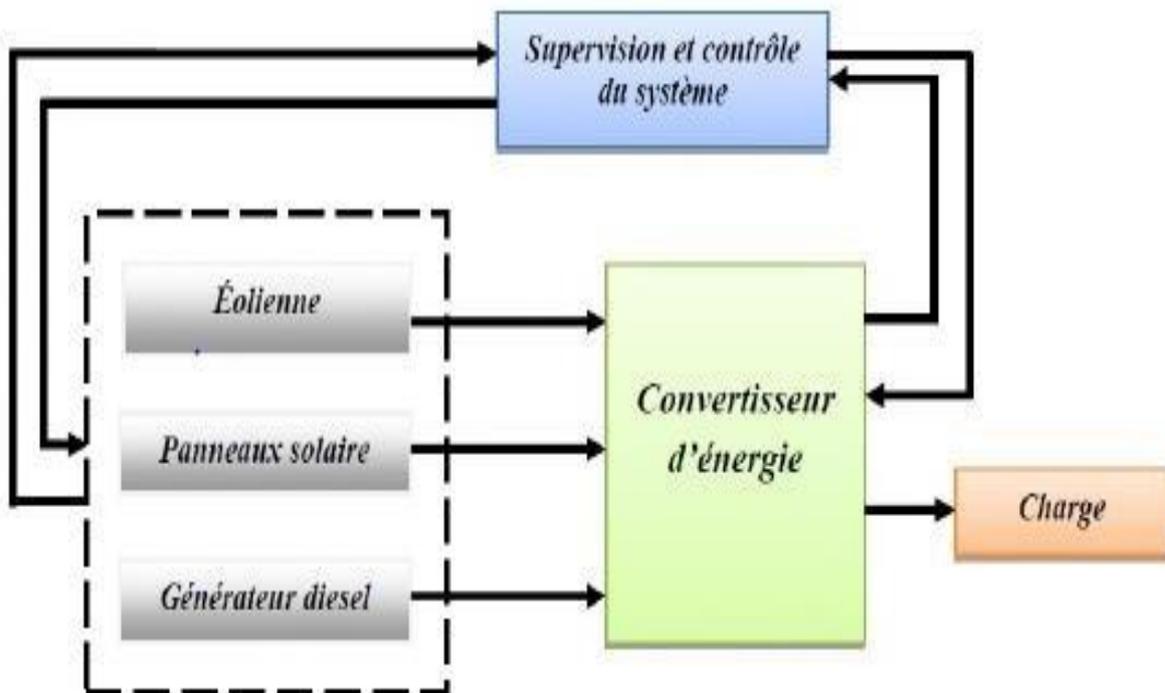


Fig I. 1 : Structure d'un système autonome connecté à une charge

Parmi ces systèmes autonomes on distingue :

I.1.2. Système photovoltaïque autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker surplus de l'énergie générée. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [10].

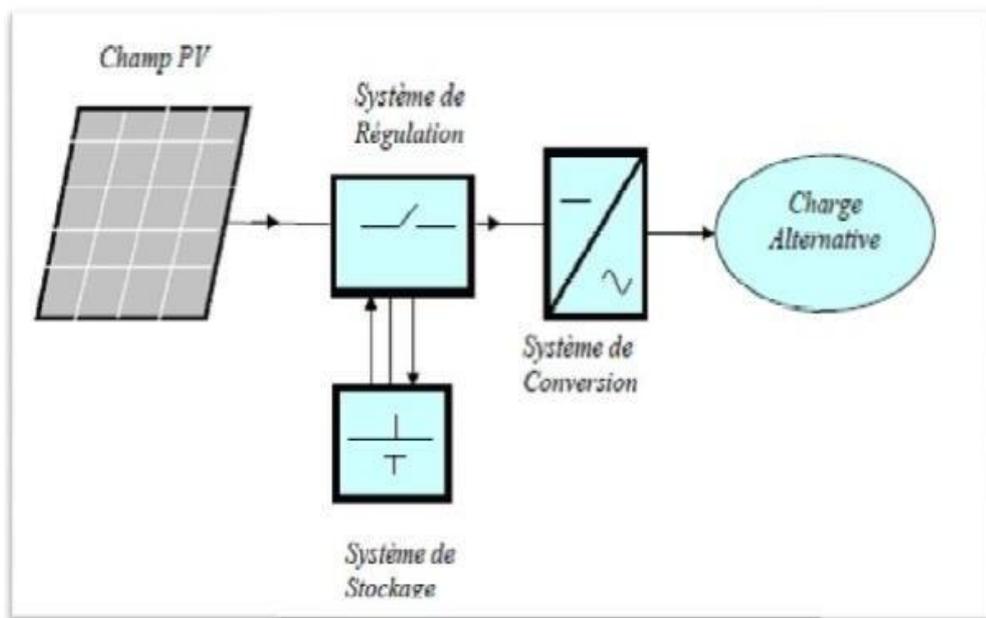


Fig I. 2 : Schéma simplifié d'un système PV autonome

I.1.3 Système éolien autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de par leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [10-11].

Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation, des générateurs synchrones sont également utilisés [12].

Ils offrent un bon couple massique et peuvent éventuellement s'affranchir de multiplicateur de vitesse. Néanmoins, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille [13].

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages.

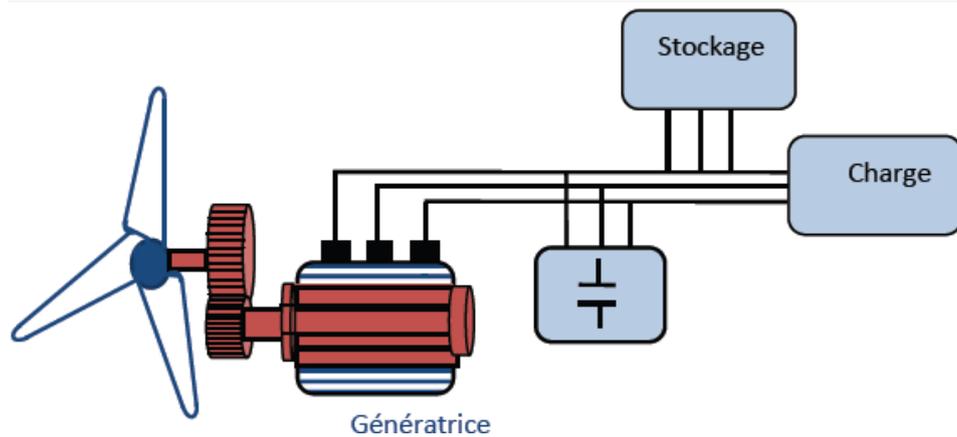


Fig I. 3 : Système éolien en fonctionnement autonome

I.1.4 Système hydraulique autonome

Une autre source d'énergie renouvelable souvent utilisée pour charger les batteries sont les micro-turbines à eau. Cette méthode de production d'électricité dirige un courant d'eau, tel qu'une cascade ou une rivière, à travers une petite turbine qui est connectée à un alternateur. Du fait que la production du courant se fait 24h/24, une micro turbine placée dans un courant d'eau puissant surpasse de loin les systèmes solaire ou éoliens de même puissance en quantité d'énergie produite.

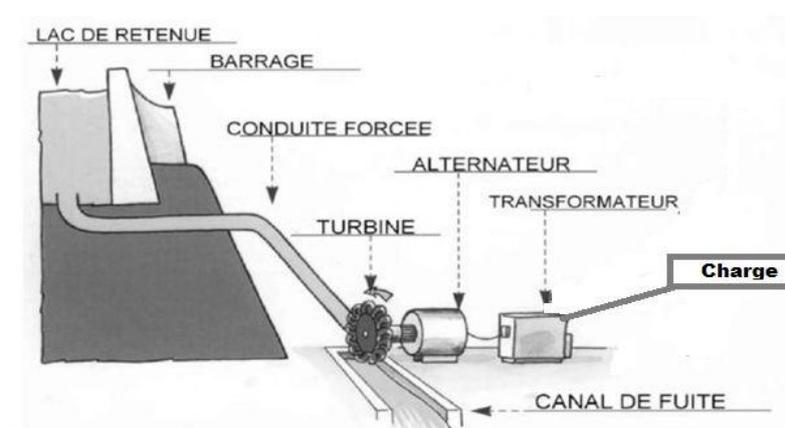


Fig I. 4 : centrale de production d'électricité

I.2 Machines utilisées pour les systèmes autonomes

I.2.1 Machines synchrones

➤ Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [5] [14].

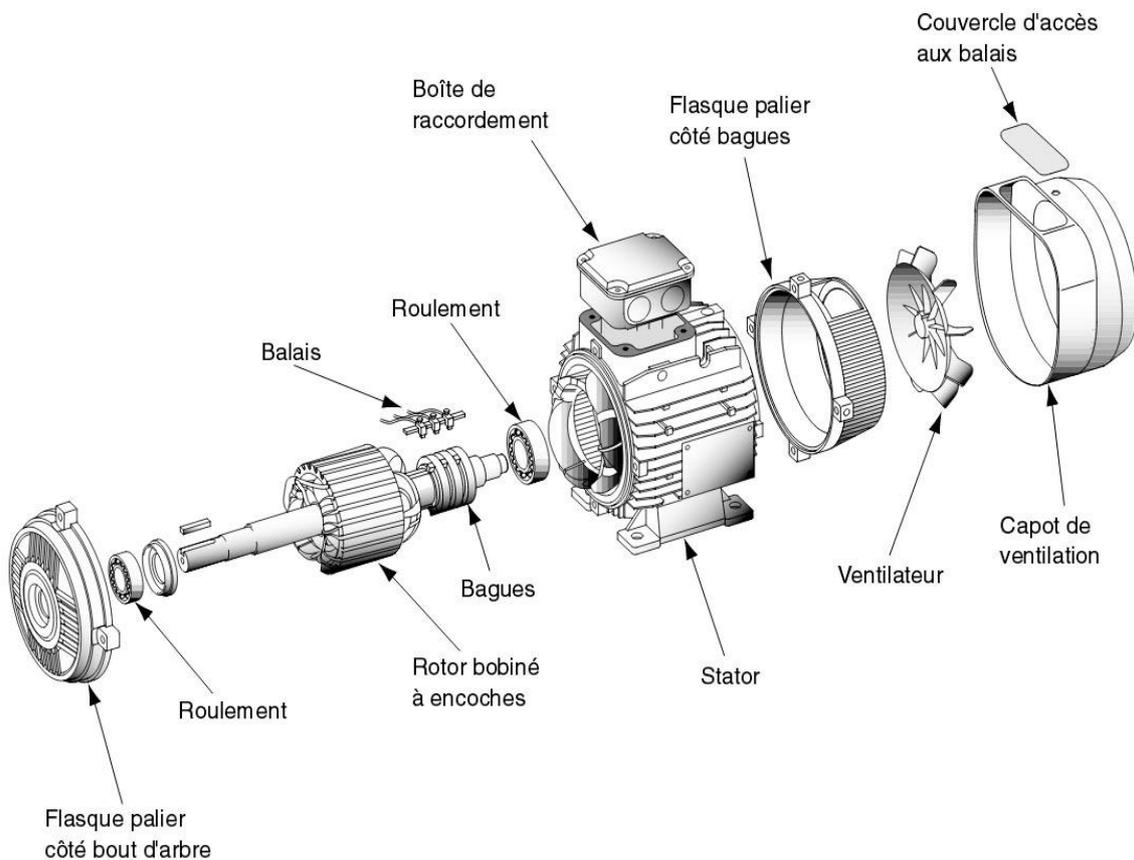


Fig I. 5 : Machine synchrone à rotor bobiné

➤ Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

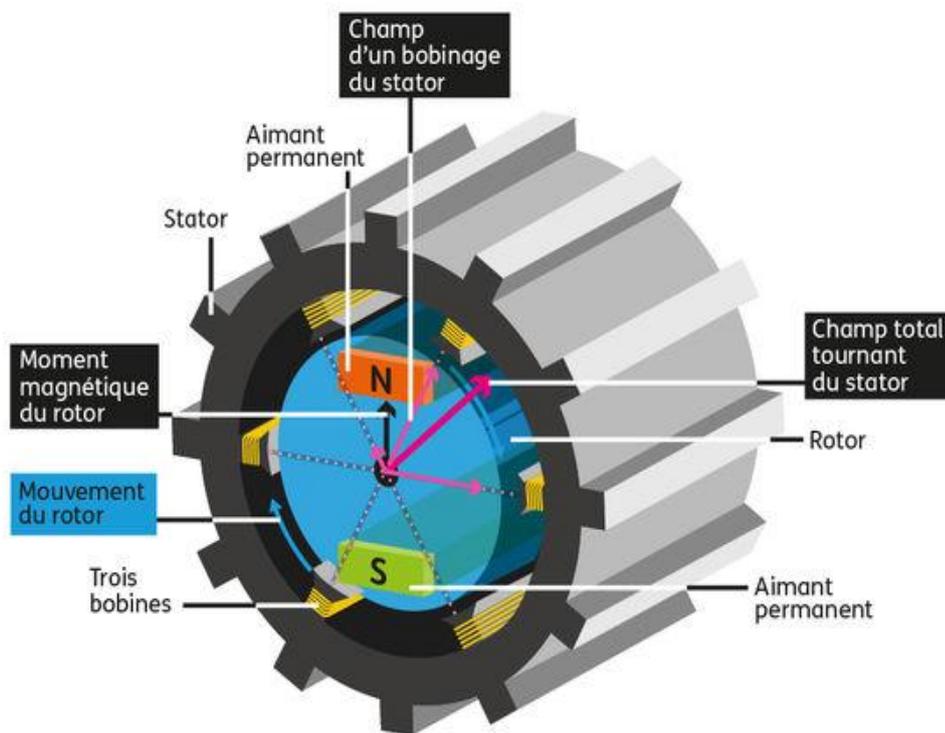


Fig I. 6 : Machine synchrone à aimants permanents

I.2.2 Machines asynchrones

➤ Machines asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par balais- collecteurs et d'aimants permanents ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égales et également un coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance. Enfin, elle est très tolérante à des régimes extrêmes de fonctionnement (survitesses, surcharges ... etc.).

Le revers de la médaille est constitué d'une tension dont l'amplitude et la fréquence sont, dans le cas d'un fonctionnement autonome, très sensibles aux variations de vitesses et de charges. Par ailleurs, comme mentionné précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient. Afin d'éliminer ce dernier vis à vis de la machine synchrone, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature. Dans ce qui suit, nous donnons une synthèse de quelques systèmes permettant de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone et de stabiliser sa tension statorique [5].

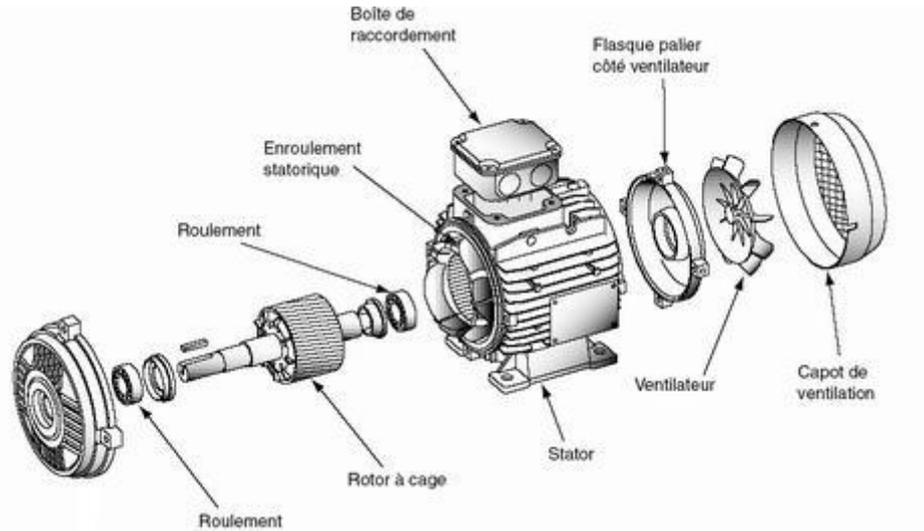


Fig I. 7 : Machine asynchrone à cage

➤ **Machines asynchrones a rotor bobiné**

Le rotor d'une machine asynchrone est similaire au stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petites machines, les tôles sont découpées en une seule pièce assemblées sur un arbre. Dans de plus grosses machines, chaque lamination est constituée de plusieurs et montée sur un moyau. Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour diminuer les harmoniques d'espace et réduire la réactance liée à la position de la variation angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques [7].

On dispose des fils de conducteurs dans les encoches formant ainsi un bobinage polyphasé de même nombre de pair de pôle que le stator. En général, c'est un bobinage triphasé connecté en étoile d'une part et de l'autre, il est relié à trois bagues fixées sur l'arbre 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) pour améliorer les performances de démarrage (un couple électromagnétique très élevé et un faible appel du courant statorique).



Fig I. 8 : Machine asynchrone à rotor bobiné

➤ **Machine asynchrone en cascade**

On désigne par cascade, le couplage de deux machines électriquement et mécaniquement, ou seulement mécaniquement. De telle sorte que les balais et les bagues de glissement ne sont plus requis. [7]

La figure (I.9) représente la structure en de deux machine asynchrone :

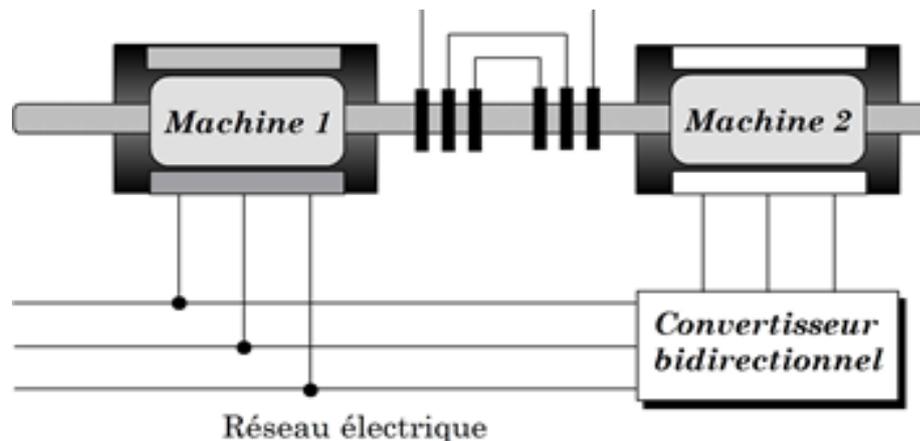


Fig I. 9: Structure en cascade de deux machines asynchrones [7]

I.2.3 Machines multi-phasées

Il existe une grande variété de machines multiphasiques, suite au nombre de phases supérieur à trois qu'on peut avoir dans le stator,

On différencie habituellement deux types de machines multi-phasées suivant que le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois (type 1 ou multi-étoile et type 2 regroupe le reste des machines ou le nombre de phases est impair), de plus on considère rarement les cas où le nombre de phase est un nombre pair [17-18].

I.2.3.1 Caractéristiques des machines multi-phasées

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator (les phases statorique) qui est ou non multiple de trois, on distingue deux types :

➤ **Machines multi-phasées de type1**

Dans ce type de machines le nombre de phases statoriques est un multiple de trois, on peut les grouper en η étoile triphasées $q = 3\eta$ $\eta = (1, 2, 3, \dots)$.

➤ **Machines multi-phasées de type2**

Les machines multiples de type 2 dont le nombre de phases statorique q impaire

$q = 2\eta + 1$ ($\eta=1, 2, 3, \dots$). Pour le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes, les phases sont décalées régulièrement de $2\alpha = \frac{2\pi}{q}$, Alors on a : $q = q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$

I.2.4 Applications des machines multi-phasées

Il existe de nombreuses applications des machines asynchrones multiphasées telles que les pompes, ventilateurs, compresseurs, laminoirs, broyeurs à ciment, les treuils de mine, les véhicules électriques / hybrides, les applications aérospatiales, la propulsion du navire, la traction de la locomotive etc... [17, 19].

➤ **Machines asynchrones double étoile**

La machine asynchrone double étoile est une machine asynchrone à six-phases qui comprend deux bobinages statoriques fixes déphasés entre eux d'un angle α et un bobinage rotorique mobile, parmi les angles les plus utilisés on trouve le plus souvent $\alpha = 30^\circ$.

Chaque étoile de la machine asynchrone à double étoile est composée de trois enroulements identiques, leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal à 120° dans l'espace et sont logés dans des encoches du circuit magnétique.

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé équilibré de courant, d'où 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 tel que : $\omega = p\Omega$.

La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques). Ce choix permet d'obtenir des machines peu onéreuses, robustes, facile d'emploi et nécessitent un entretien limité [21].

Les courants triphasés de fréquence « f_s » alimentant l'enroulement 1 du stator de la machine, donnent naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme « N_s » tel que : $N_s = 60 * f_s / p$ [tr/mn] Où p : est le nombre de paires de pôles [22].

Les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle (α) alimentant l'enroulement 2 de même stator donnent eux aussi naissance à un autre champ tournant à la même vitesse de synchronisme « N_s ». Ces deux Champs tournants produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor, générant ainsi des forces

électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse « N_r » inférieure à celle du synchronisme ($N_r < N_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force, électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

La figure (I.10) représente un système éolien autonome à base d'une machine asynchrone double étoile.

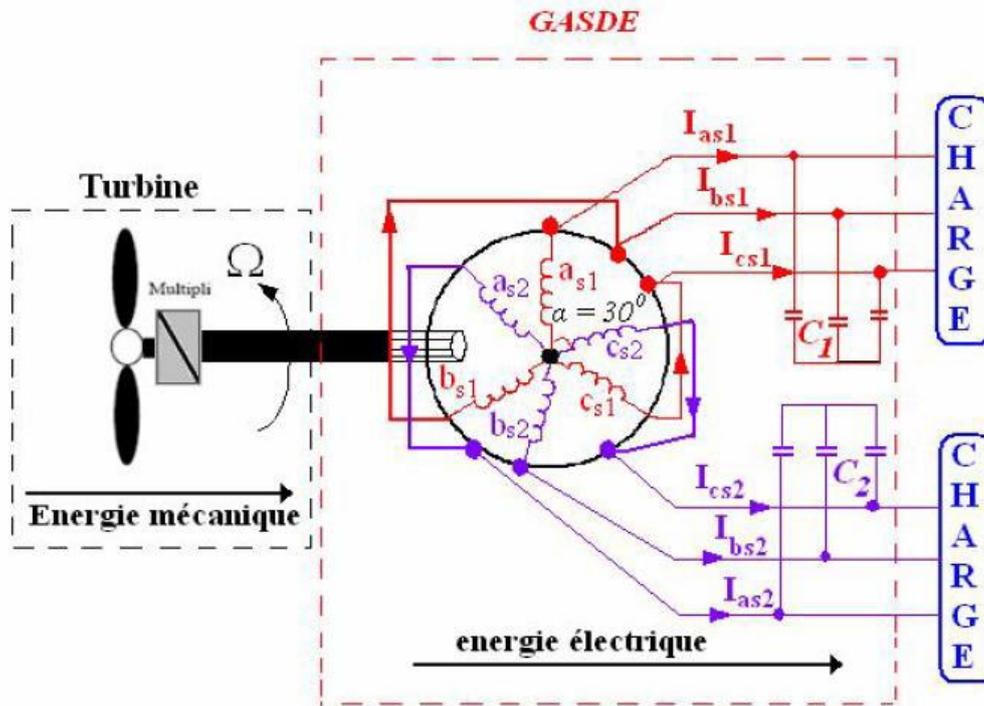


Fig I. 10 : MASDE autonome connecté à une éolienne

➤ **Avantages des machines doubles étoiles**

Les machines doubles étoiles, présentent de nombreux avantages par rapport à leurs homologues triphasés tels que :

- La segmentation de puissance, comme la machine double étoiles contient plusieurs phases, donc pour une puissance donnée, les courants par phases sont diminués et cette puissance est donc répartie sur le nombre des phases.
- Employant les machines à induction à plusieurs phases permettrait de réduire le couple Pulsatoire et augmenterait l'efficacité de la machine.
- Les machines à induction polyphasés moins de bruit par rapport à ceux triphasés.

- Les nombres des phases élevées fournissent une meilleure performance du moteur en cas de perte d'une ou plusieurs phases. (fonctionnement en régimes dégradés) [23-24].

➤ **Inconvénients des machines doubles étoiles**

- 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 [25].
- L'apparition des courants harmonique de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension [26].

Conclusion

La technologie de la machine à induction à plusieurs phases, une fois développée à l'état de l'application pratique, a présenté de nombreux avantages par rapport aux systèmes conventionnels, et un des exemples les plus courants des machines multi-phases est la Machine Asynchrone Double Etoile (MASDE).

Dans ce chapitre, des généralités ont été présentés où nous avons cité ses deux types connus sous le nom machines multi-phrasées de type 1 et machines multi-phrasées de type 2, nous avons également cité leurs avantages et leurs inconvénients. Certains avantages de cette machine sont ; la segmentation de puissance et l'amélioration de la fiabilité en offrant la possibilité de fonctionner correctement en régime dégradé (c'est à dire si une ou plusieurs phases sont ouverts ou court-circuit) sans oublier son inconvénient de coût qui augmente avec l'augmentation du nombre de phases statorique de la machine d'où l'augmentation des convertisseurs statiques.

Le chapitre suivant, fait l'objet de la modélisation de différentes parties de la machine asynchrone double étoile(MASDE).

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone double étoile

Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique c'est ce qu'on appelle modélisation.

La modélisation c'est une transformation de système à des équations mathématique. Comme tout système, l'étude des machines électriques s'appuie sur un modèle de représentation. Cette modélisation est très importante pour l'étude, l'analyse et la simulation de la commande des machines.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle mathématique de la MASDE, où nous sommes intéressés au mode de fonctionnement « Moteur », et le simuler avec une alimentation sinusoïdale triphasée, puis par l'alimentation de la MASDE par deux onduleurs commandés par une MLI. Ces classes de modèles dépendent directement des hypothèses simplificatrices prends-en considération, de la nature de la source d'alimentation et du choix des composantes du vecteur d'état. [27]

II.1 Description de la machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile est une machine asynchrone à six-phares qui comprend deux bobinages statoriques fixes déphasés entre eux d'un angle α et un bobinage rotorique mobile, comme l'illustre la (Fig. II.1).

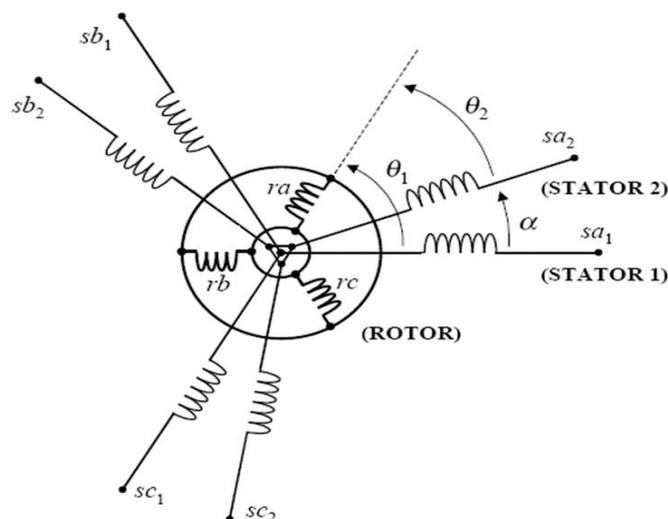


Fig II. 1 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile [23]

Chaque étoile de la machine asynchrone à double étoile est composée de trois enroulements identiques, leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal à 120° dans l'espace et sont logés dans des encoches du circuit magnétique.

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé équilibré de courant, d'où 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 tel que : $\Omega = \omega_s / P$

La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques). Ce choix permet d'obtenir des machines peu onéreuses, robustes, facile d'emploi et nécessitent un entretien limité [21].

II.2 Modélisation de la MASDE

Avant d'établir le modèle de la MASDE, nous rappelons brièvement les hypothèses, désormais classiques, retenues l'étude de cette machine traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel des hypothèses simplificatrices [29-30].

➤ Hypothèses Simplificatrices d'Etude

Dans une machine plusieurs phénomènes complexes interviennent lors de son fonctionnement. Pour réduire et négliger cette complexité, il est important de poser les hypothèses simplificatrices suivantes : [23-31-32]

- ✓ La saturation, les effets d'hystérésis des circuits magnétiques, pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) et l'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances sont négligés ;
- ✓ Les six phases statoriques ont les mêmes caractéristiques électriques.
- ✓ Les enroulements créent une force magnétomotrice à répartition sinusoïdale et on ne tient compte que de la première harmonique.
- ✓ Le stator est supposé lisse en admettant que les irrégularités de l'entrefer liées aux encoches statoriques ont une influence négligeable, le couple de détente, dû à l'interaction des aimants rotoriques et les dents statoriques, sont alors négligés.
- ✓ La répartition de l'induction le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale.

L'écriture des équations des tensions des phases des deux enroulements du stator et du rotor sont données comme suit : [5,7]

➤ **Equations de Tensions**

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s1}] \\ [v_{s2}] = [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s2}] \\ [v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Les vecteurs des tensions, courants et flux (statoriques et rotoriques) sont [34] :

$$[v_{s1}] = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix}; [v_{s2}] = \begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$[i_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix}; [i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[\phi_{s1}] = \begin{bmatrix} \phi_{as1} \\ \phi_{bs1} \\ \phi_{cs1} \end{bmatrix}; [\phi_{s2}] = \begin{bmatrix} \phi_{as2} \\ \phi_{bs2} \\ \phi_{cs2} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Où :

$[R_{s1}]$, $[R_{s2}]$, $[R_r]$: les matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} [R_{s1}] = \text{diag}[r_{as1} \ r_{bs1} \ r_{cs1}] \\ [R_{s2}] = \text{diag}[r_{as2} \ r_{bs2} \ r_{cs2}] \\ [R_r] = \text{diag}[r_{ar} \ r_{br} \ r_{cr}] \end{array} \right. \quad (2.5)$$

➤ **Equations magnétiques**

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par : [37]

$$\begin{bmatrix} [\phi_{s1}] \\ [\phi_{s2}] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{1,1}] & [L_{1,2}] & [L_{1,r}] \\ [L_{2,1}] & [L_{2,2}] & [L_{2,r}] \\ [L_{r,1}] & [L_{r,2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Où, les matrices des inductances sont exprimées comme suit :

$$[L_{11}] = \begin{bmatrix} (L_{f1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[L_{22}] = \begin{bmatrix} (L_{f2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{f2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} (L_{fr} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{fr} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{fr} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$[L_{12}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[L_{1r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[L_{2r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Avec :

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

$$L_1 = L_2 = (L_{ms} + L_{f1}), L_r = (L_{ms} + L_{fr}), \text{ telque } L_{ms} = L_{mr}$$

II.3 Modèle biphasé de la MASDE selon le système d'axes d, q

II.3.1 Transformation de Park

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, (direct, en quadrature et homopolaire).

La modélisation de la MASDE passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement [38], 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 [33] :

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[A_{ps2}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[A_{pr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La matrice inverse de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Avec :

$\theta = \int_0^t \omega_s dt$: Angle entre les systèmes d'axes biphasés et triphasés.

ω_s : vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

Le choix de cet axe est lié à son immobilité par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques.

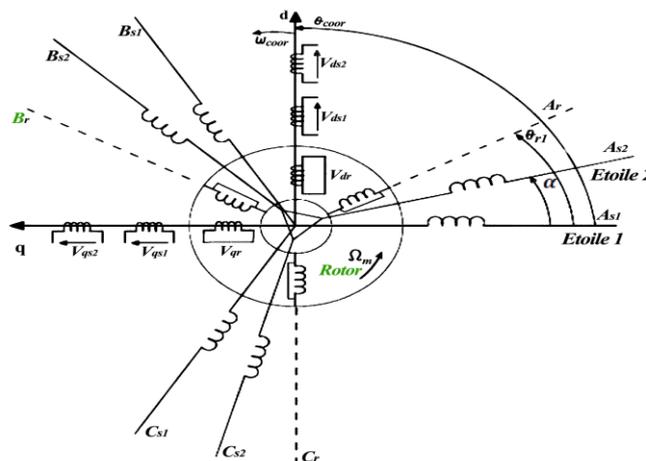


Fig II. 2 : Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes (d,q) [17]

En appliquant les matrices de Park dans le système d'équation (2.1) on obtiendra le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1} = r_1 I_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ V_{qs1} = r_1 I_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} + \omega_s \Phi_{ds1} \\ V_{ds2} = r_2 I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ V_{qs2} = r_2 I_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} + \omega_s \Phi_{ds2} \\ V_{dr} = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_{gl} \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_{gl} \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds1} = L_1 I_{ds1} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = L_1 I_{qs1} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_2 I_{ds2} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs2} = L_2 I_{qs2} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (2.18)$$

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 système d'équations (2.18) dans (2.17) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

Où :

$$[B][U] = [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega_{gl} [C][I] + [D][I] \quad (2.19)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de commande; } [I] = \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'état.}$$

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

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_1 + L_{ms}) & 0 & L_{ms} & 0 & L_{ms} & 0 \\ 0 & (L_1 + L_{ms}) & 0 & L_{ms} & 0 & L_{ms} \\ L_{ms} & 0 & (L_2 + L_{ms}) & 0 & L_{ms} & 0 \\ 0 & L_{ms} & 0 & (L_2 + L_{ms}) & 0 & L_{ms} \\ L_{ms} & 0 & L_{ms} & 0 & (L_r + L_{ms}) & 0 \\ 0 & L_{ms} & 0 & L_{ms} & 0 & (L_r + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

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

[D]

$$= \begin{bmatrix} r_{s1} & -\omega_s(L_1 + L_{ms}) & 0 & -\omega_s L_{ms} & 0 & -\omega_s L_{ms} \\ -\omega_s(L_1 + L_{ms}) & r_{s1} & \omega_s L_{ms} & 0 & \omega_s L_{ms} & 0 \\ 0 & -\omega_s L_{ms} & r_{s2} & -\omega_s(L_2 + L_{ms}) & 0 & -\omega_s L_{ms} \\ \omega_s L_{ms} & 0 & -\omega_s(L_2 + L_{ms}) & r_{s2} & \omega_s L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système (2.19) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt}[I] = [L]^{-1}\{[B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I]\} \quad (2.20)$$

➤ **Couple Electromagnétique**

Pour trouver l'expression du couple dans système d'axe (d,q) il est nécessaire de déterminer la puissance absorbée instantanée. [36] La particularité de la transformation de Park est de conserver la puissance absorbée, on peut écrire alors :

$$p_a = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (2.21)$$

En remplaçant les tensions (v_{d1}, v_{q1}, v_{d2} et v_{q2}) par leurs expressions dans (2.21), on trouve :

$$p_a = \left(\begin{array}{l} [R_1 i_{ds1}^2 + R_1 i_{qs1}^2 + R_2 i_{ds2}^2 + R_2 i_{qs2}^2] \\ + \left[\frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right] \\ + \omega_s [\varphi_{ds1} i_{ds1} + \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} + \varphi_{qs2} i_{qs2}] \end{array} \right) \quad (2.22)$$

L'expression (2.22) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule.
- Le second terme représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie).

- Le dernier terme est la puissance électromagnétique (P_{em}).

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = P \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (2.23)$$

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

$$C_{em} = P(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (2.24)$$

En remplaçant les flux (φ_{ds1} , φ_{qs1} , φ_{ds2} , φ_{qs2}) donné par (2.18) dans (2.24),

On obtient :

$$C_{em} = PL_m[(i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}] \quad (2.25)$$

A partir des équations des flux rotoriques (ϕ_{ds2} et ϕ_{qs2}) exprimées par (2.18),

On tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\phi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (2.26)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\phi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (2.27)$$

En introduisant (2.26) et (2.27) dans l'équation (2.25), on aura la relation du couple électromagnétique exprimé en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\phi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\phi_{qr}] \quad (2.28)$$

Enfin, pour compléter la relation (2.28), on doit ajouter les équations suivantes :

Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega_r \quad (2.29)$$

$$\text{Avec : } \Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (2.30)$$

$$\text{Et : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \tag{2.31}$$

Les équations (2.29), (2.30), (2.18) et (2.26) constituent un modèle électromécanique complet de la MASDE, conformément aux hypothèses simplificatrices d'étude.

II.4 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes d, q

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (II.3).

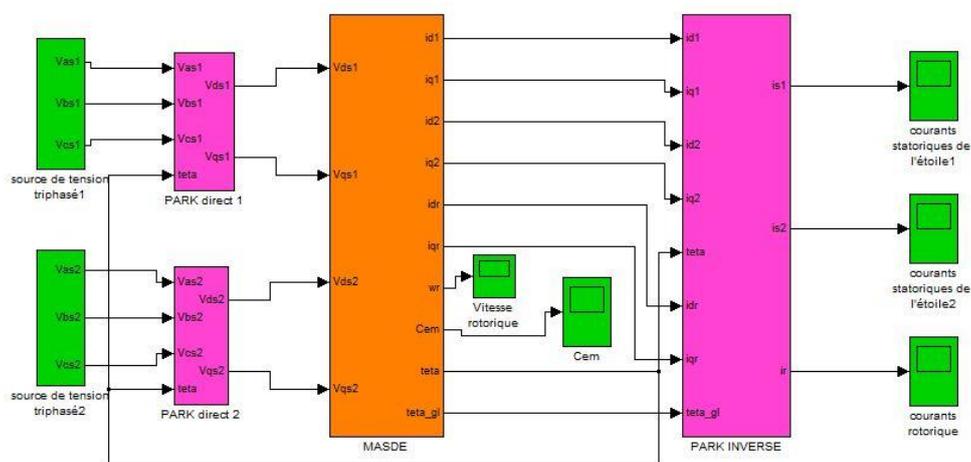


Fig II. 3 : Schéma bloc global de simulation de la MASDE en (d, q)

Les figures (II.4-II.11) 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 $t = 1.5(s)$ d'une valeur de 10(N.m), et on a éliminé la charge à l'instant $t=3(s)$ puis on a appliqué une autre charge négative à l'instant $t = 4(s)$ d'une valeur de -10(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 56.8(N.m). Cela est nécessaire pour vaincre l'inertie du moteur, après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone double étoile

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1.3(s) qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313.6 (rad/s).

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 10 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 24.2(A) pour permettre au couple électromagnétique de vaincre l'inertie de la machine.

Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 2(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 aussi et que les valeurs de ces courants établis sont presque nulles.

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 1.5$ (s) provoque une perturbation qui sera compensée par l'accroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de 10.3(N.m).

Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 4(A). Pour la vitesse on constate qu'elle chute jusqu'à 296.6 (rad/s). À l'instant $t = 1.5$ (s), le courant statorique direct prend la valeur de -2.05(A), alors que le courant en quadrature prend la valeur de -4.5(A).

A l'instant $t=3$ (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 $t = 4.5$ (s) provoque une perturbation qui sera compensée par le décroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de -9.6(N.m). Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 3.6(A).

Pour la vitesse on constate qu'elle augmente jusqu'à 328 (rad/s). À l'instant $t = 4.5$ (s), le courant statorique direct prend la valeur de -2.16(A), alors que le courant en quadrature prend la valeur de 3.8 (A).

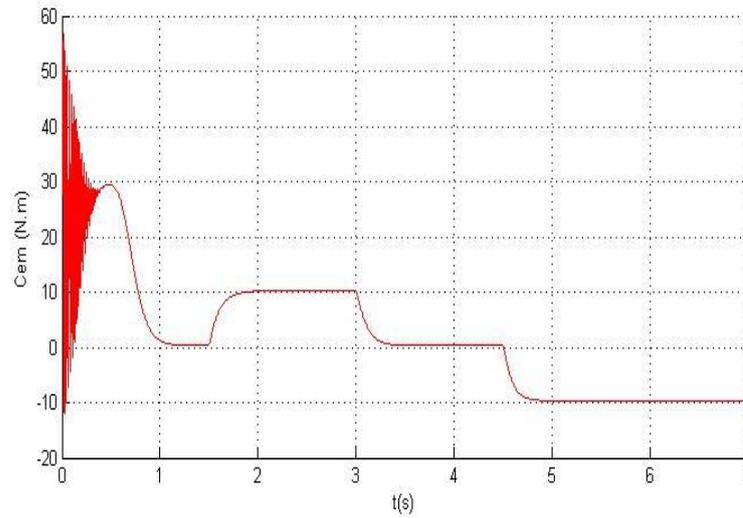


Fig II. 4 : Couple électromagnétique de la MASDE

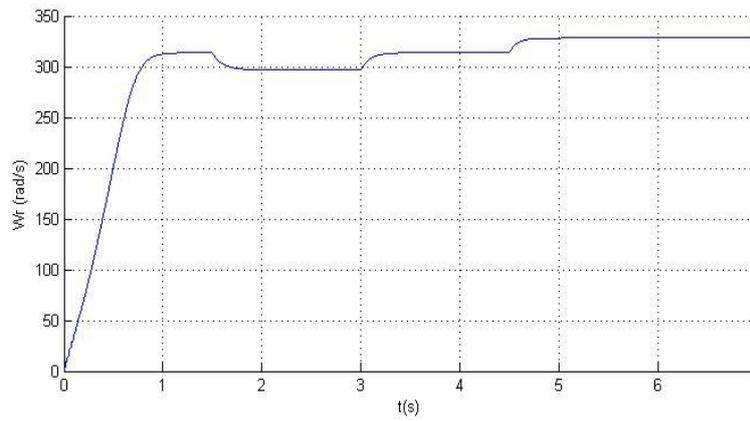


Fig II. 5 : Vitesse de rotation rotorique de la MASDE

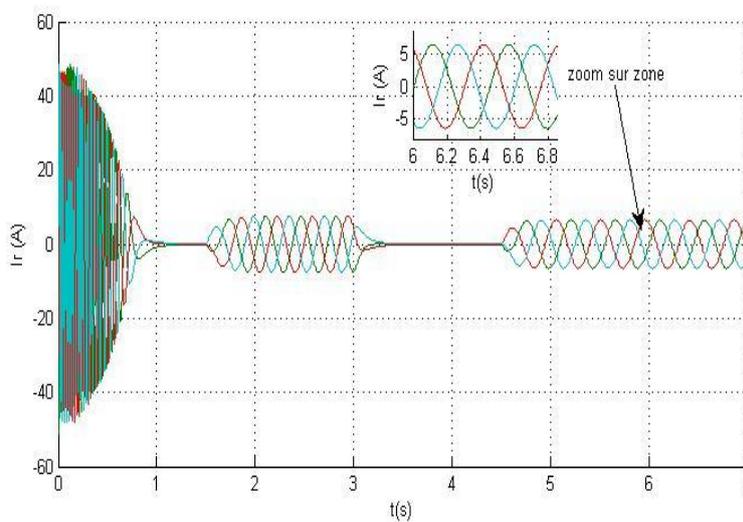


Fig II. 6: Courants rotoriques de la MASDE

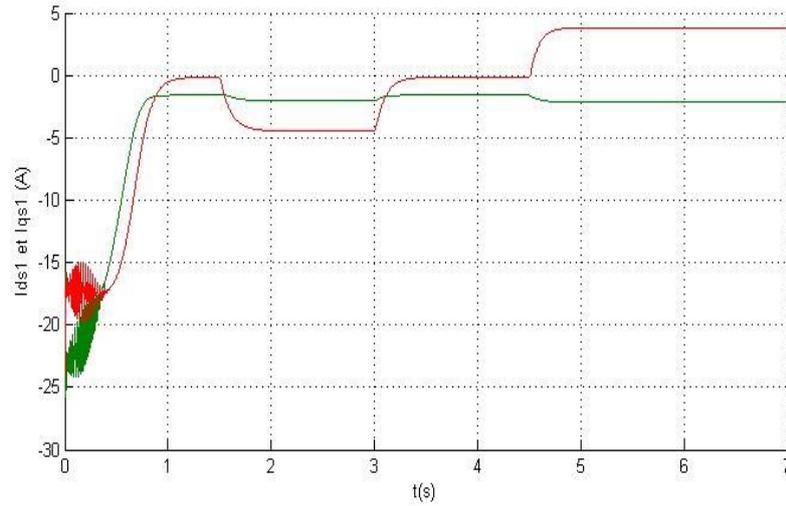


Fig II. 7 : Courants statoriques direct et en quadrature de l'étoile 1 de la MASDE

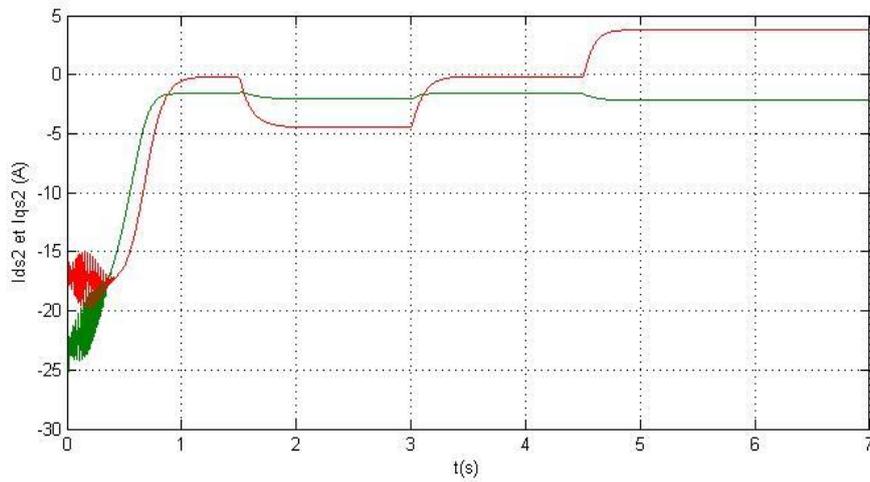


Fig II. 8 : Courants statoriques direct et en quadrature de l'étoile 2 de la MASDE

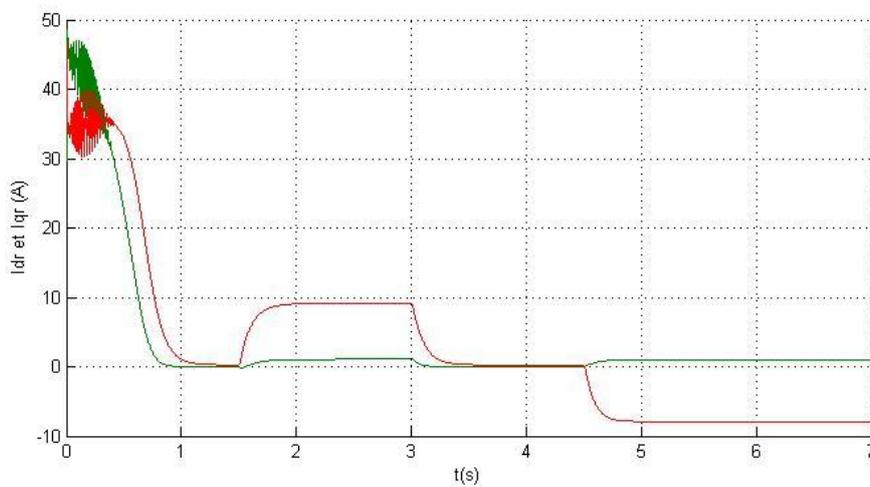


Fig II. 9 : Courants rotoriques direct et en quadrature de la MASDE

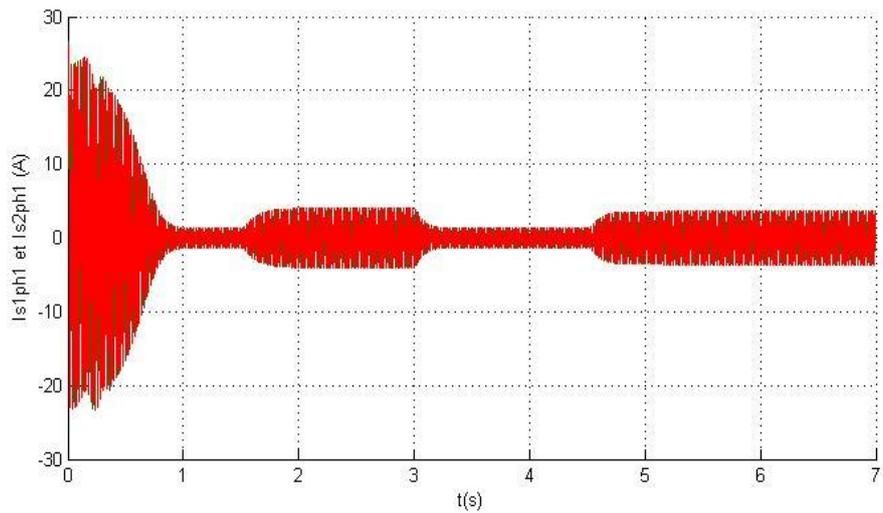


Fig II. 10 : Courants statoriques de la première phase des deux étoiles de la MASDE

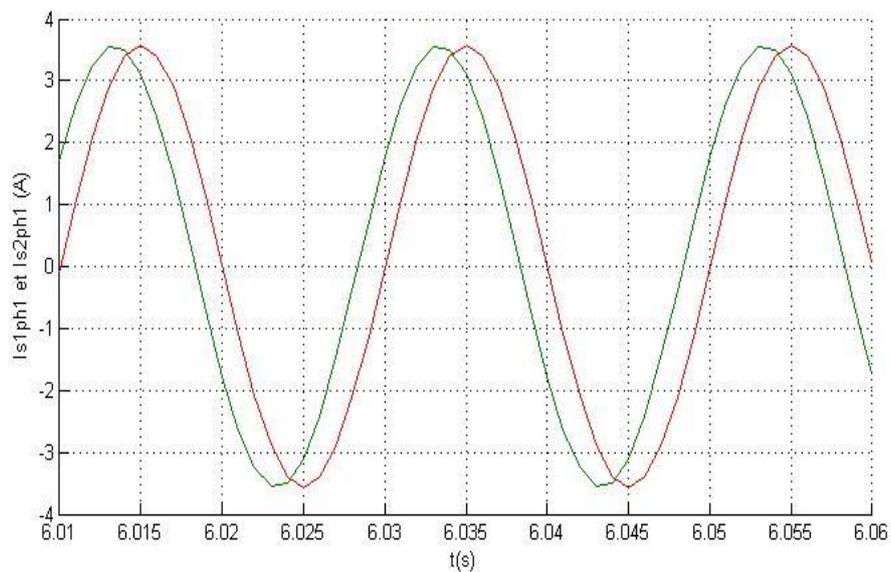


Fig II. 11 : Zoom des courants statoriques de la première phase des deux étoiles de la MASDE

II.5 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande M.L.I

II.5.1 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable.

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable.

Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées, ce dernier est constitué de trois bras où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante [37] :

$$f_i = \begin{cases} 1 \text{ l'interruptur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit}, K_i \text{ bloqué}) \\ 0 \text{ l'interruptur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué}, K_i \text{ conduit}) \end{cases}$$

$$f_i + \bar{f}_i = 1 \text{ et } i = 1$$

La figure qui suit représente le schéma de l'onduleur triphasé.

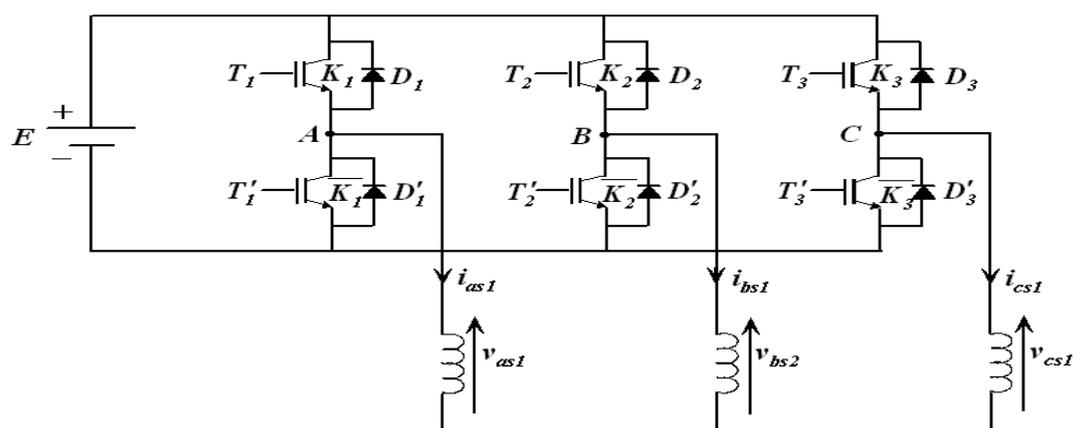


Fig II. 12 : Onduleur à commande MLI triphasé

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (2.32)$$

Les tensions simple v_{as1} , v_{bs1} et v_{cs1} forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (2.33)$$

La résolution du système d'équations (2.32) et l'équation (2.33) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = E/3 \left\{ \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.34)$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = E/3 \left\{ \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.35)$$

II.5.2 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire [38].

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

- Pour la première étoile : espace dans les équations

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi/t) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(\frac{2\pi}{t} - 2\pi/3\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(\frac{2\pi}{t} + 2\pi/3\right) \end{array} \right\} \quad (2.36)$$

- Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations (2.34), $(2\pi ft)$ par $(2\pi ft - \alpha)$ et l'indice 1 par 2.
- L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_{pr}(t) = \left\{ \begin{array}{l} v_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] \text{ si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ v_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] \text{ si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation (m) égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f).

- Le coefficient de réglage en tension (r) égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (v_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (v_{pm}).

II.5.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La représentation schématique de l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension à commande M.L.I sinus-triangle est donnée par la figure (II.13).

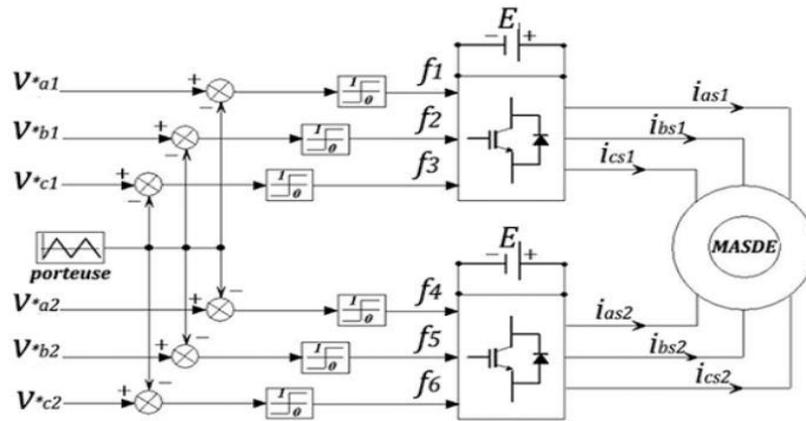


Fig II. 13: Schéma MASDE-convertisseur de tension à commande MLI

II.6 Simulation et interprétation des résultats

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (II.14)

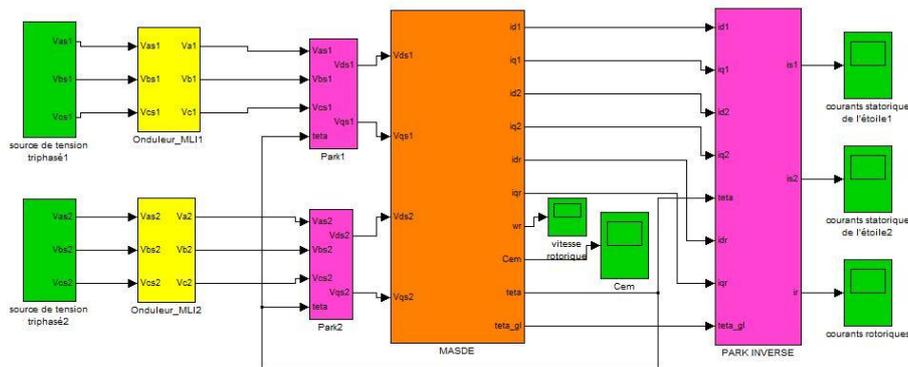


Fig II. 14: Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par un onduleur M.L.I

La simulation est effectuée pour un décalage angulaire ($\alpha = 30^\circ$).

Les figures (II.15-II.24) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à commande M.L.I. sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$, suivi de l'application des charges $C_r = 10, -10$ et -10 N.m, entre les intervalles de temps $t = [2, 2.5], [2.5, 5]$ et $[5, 7]$ seconde respectivement.

Cette dernière montre que les résultats obtenus sont approximativement similaires avec ceux obtenus par l'alimentation directe figures (II.4-II.11). Cependant, ces allures et en particulier celles, du couple électromagnétique, des courants statoriques de (étoiles 1 et 2), montrent que cette technique engendre une augmentation des ondulations dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs, qui se répercutent essentiellement sur le couple électromagnétique.

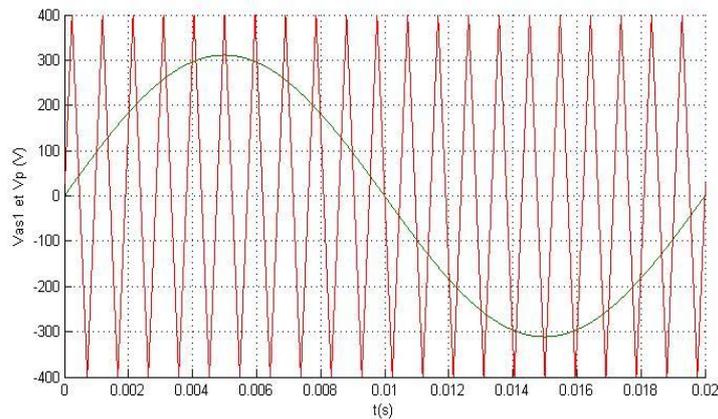


Fig II. 15: Signal de porteuse et tension de référence

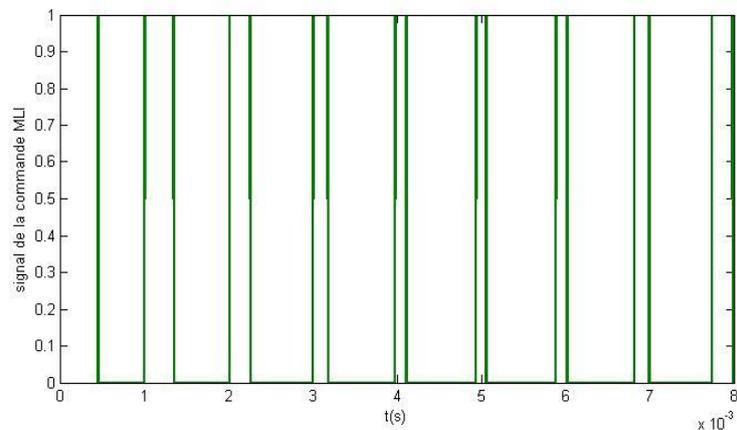


Fig II. 16 : Signal de commande des interrupteurs d'onduleur

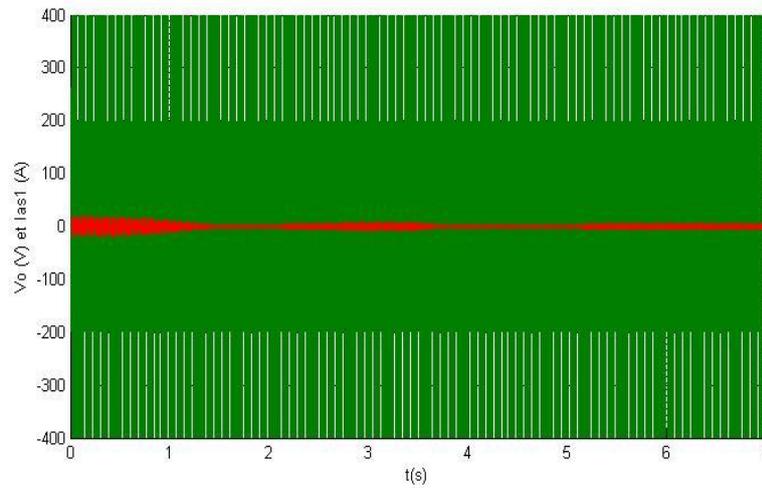


Fig II. 17 : Tension de sortie d'onduleur et le courant de la première phase de la première étoile

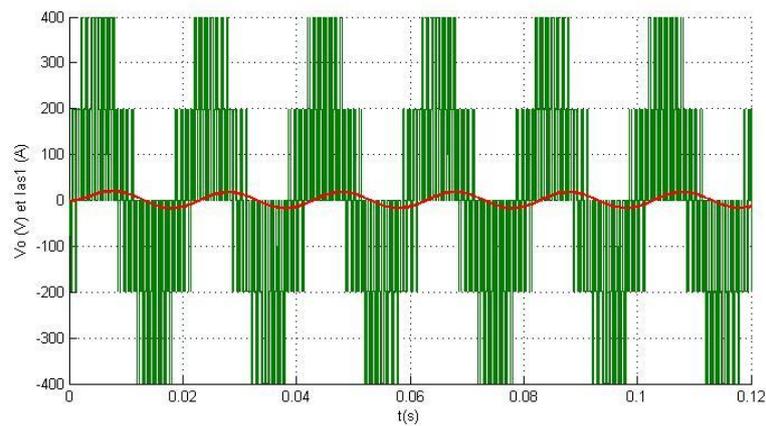


Fig II. 18 : Zoom sur la tension de sortie d'onduleur et le de courant de la première phase de la première étoile

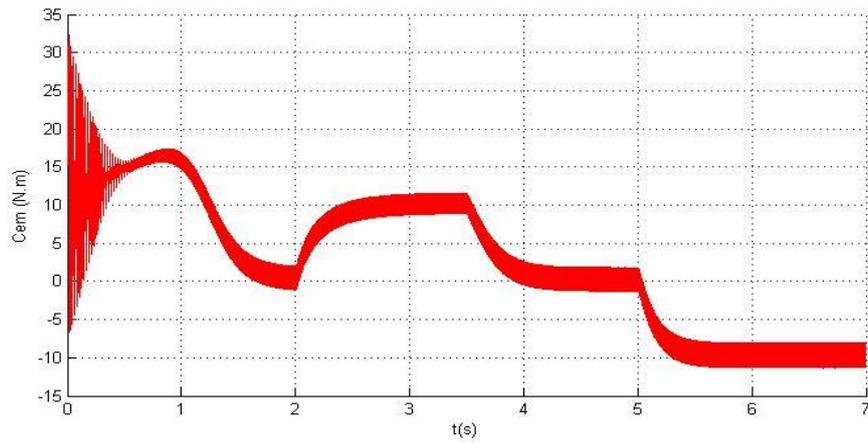


Fig II. 19: Couple électromagnétique

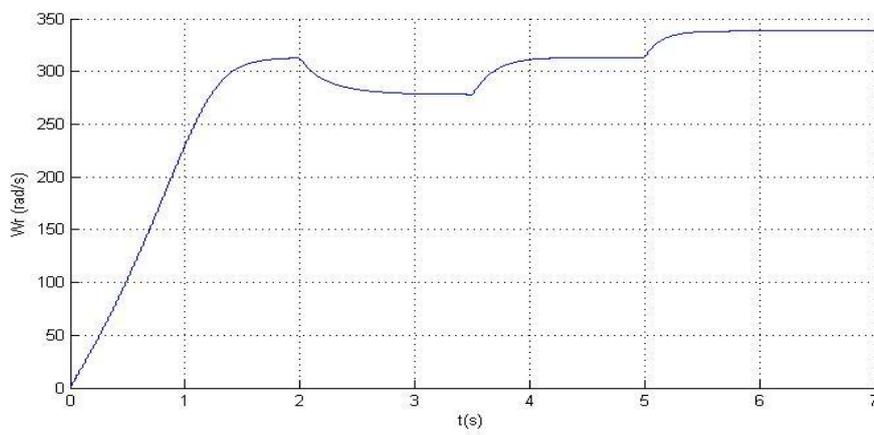


Fig II. 20 : Vitesse de rotation rotorique

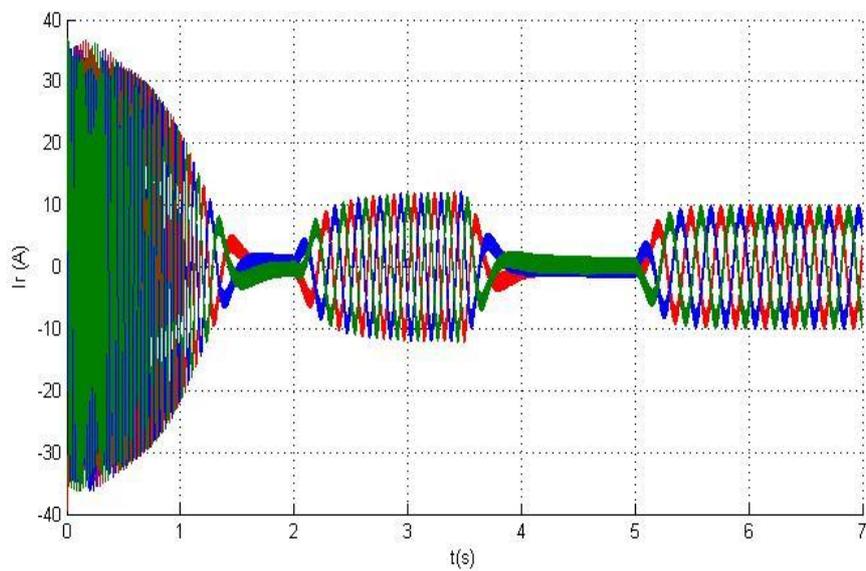


Fig II. 21 : Courants rotoriques

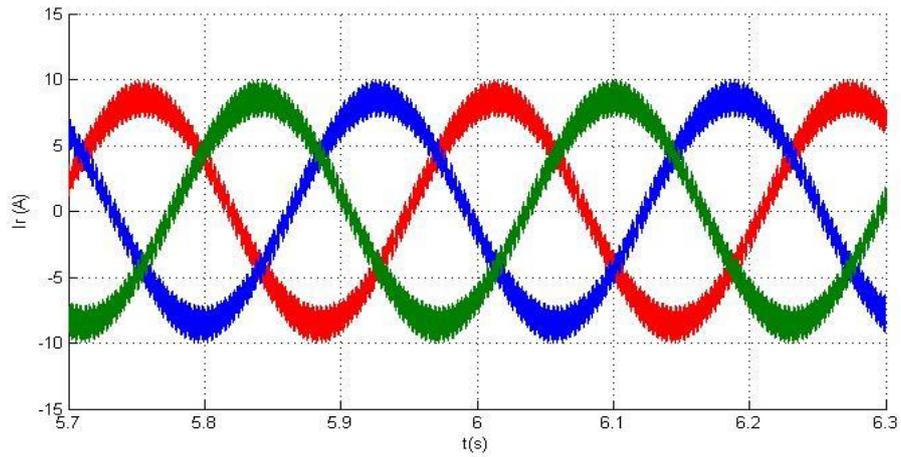


Fig II. 22: Zoom sur les courants rotoriques

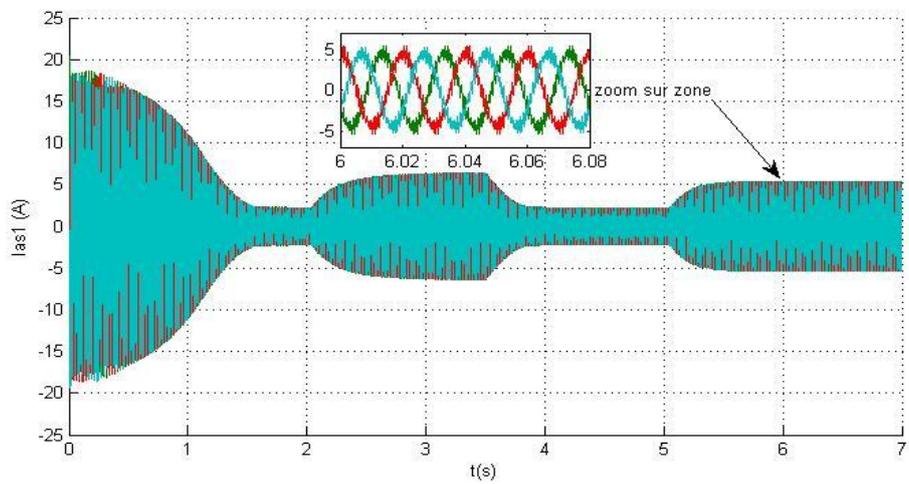


Fig II. 23 : Courants statoriques de la première étoile

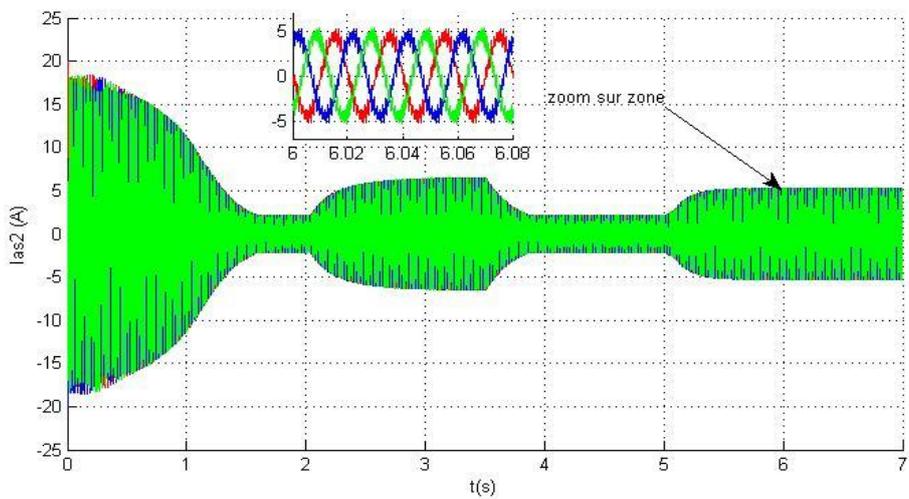


Fig II. 24 : Courants statoriques de la deuxième étoile

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'établissement du modèle mathématique de la machine asynchrone à double étoile dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

Le processus du fonctionnement du moteur, à vide et l'application d'une charge a été simulé par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

L'étude des caractéristiques de la MASDE directement alimentée par des sources sinusoïdales à vide et en charge, puis par des onduleurs de tensions à commande MLI sinusoïdale triangle en charge.

Les résultats de simulation numérique montrent la nécessité de régler la vitesse du rotor indépendamment de la charge appliquée.

Le chapitre suivant, sera consacré à des simulations de GASDE en lui appliquant une commande vectorielle (commande par orientation du flux) en fonctionnement autonome dans un régime normale, puis dans un régime dégradé.

Chapitre III : Contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome

Introduction

La commande par orientation du flux (FOC) de la génératrice asynchrone double étoile est certainement la stratégie de commande actuellement la plus élaborée pour des applications de hautes performances dans les systèmes à vitesse variable et ceux de production d'énergie, où le principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle ainsi le contrôle en fonctionnement autonome avec une régulation de vitesse seront décrits.

Un exemple de schéma de raccordement de cette machine dans un système de production d'électricité autonome, dont la GASDE de 4.5 kW, est contrôlée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI sera présenté.

III.1 Commande vectorielle

III.1.1 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle (commande par orientation de flux), consiste à régler le couple par une composante du courant et le flux par l'autre composante, c'est-à-dire qu'on oriente une des composantes de flux statoriques, rotoriques ou de l'entrefer sur un axe de référentiel tournant à la vitesse de champ tournant. La commande vectorielle conduit à de hautes performances industrielles des entraînements asynchrones (machine de papeterie, laminoirs, traction électrique etc.) supportant les perturbations de la charge. [41]

III.1.2 Choix d'orientation du flux

Pour la MASDE, On opte pour le choix de l'orientation du flux rotorique, car cela permet d'obtenir une variation de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques direct et quadratique, respectivement.

Les lois de la commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant par orientation du flux rotorique φ_r^* . On considère comme grandeurs de références le flux rotorique et le couple C_{em} et on exprime :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r^* \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

La relation finale du couple électromagnétique devient :

$$C^*_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r^* (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (3.2)$$

D'après l'équation (3.2), on constate que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée. [39]

III.1.3 Différentes méthodes de la commande vectorielle

III.1.3.1 Méthode de commande directe

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le régime de fonctionnement, pour cela deux procédés sont utilisés : [43]

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase. L'inconvénient principal de cette technique, réside dans le fait que la fragilité et les problèmes de fiabilité limitent sa mise en œuvre ;
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

III.1.3.2 Méthode de commande indirecte

Le principe de cette méthode consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais seulement sa position. La descriptive "méthode indirecte" signifie qu'on peut éliminer un estimateur ou d'un capteur du flux mais elle exige la présence d'un capteur de position du rotor. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine. [41-42]

➤ Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et par orientation du flux rotorique φ_r^* . On considère comme grandeurs de références le flux rotorique et le couple C^*_{em} .

La figure (III.1) représente le schéma de principe de la commande à flux orienté.

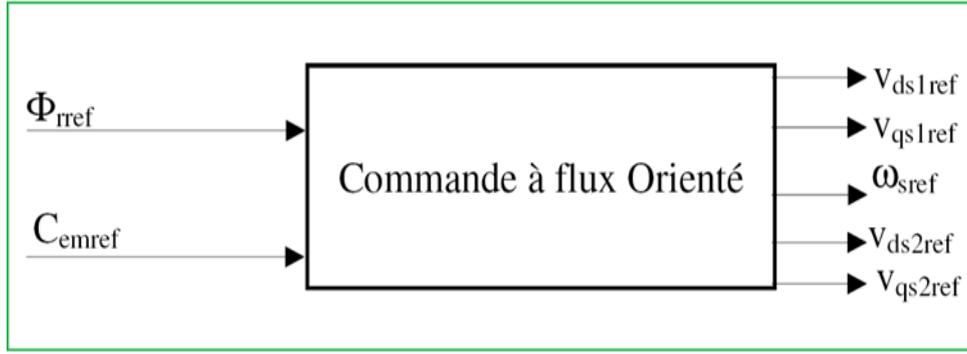


Fig III. 1: Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

En remplaçant l'équation (3.1) dans les équations des tensions rotoriques (2.17) obtenue dans le 2^{ème} chapitre :

On obtient :

$$R_r \cdot i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \quad (3.3)$$

À partir des équations (2.26) et (2.27), on trouve :

$$R_r \cdot i_{qr} + \omega_{gl}^* \cdot \phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \cdot \phi_r^*}{R_r} \quad (3.4)$$

$$i_{dr} = \frac{\phi_r^*}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (3.5)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (3.6)$$

En introduisant (3.5) et (3.6) dans le système d'équations des flux statoriques (2.19), on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds1} = \lambda_1 \cdot i_{ds1} + L_r B i_{ds2} + B \phi_r^* \\ \phi_{qs1} = \lambda_1 \cdot i_{qs1} + L_r B i_{qs2} \\ \phi_{ds2} = \lambda_2 \cdot i_{ds2} + L_r B i_{ds1} + B \phi_r^* \\ \phi_{qs2} = \lambda_2 \cdot i_{qs2} + L_r B i_{qs1} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

Avec :

$$B = \frac{L_m}{L_m + L_r} \quad \text{et} \quad \lambda_1 = L_{s1} + B L_r \quad \text{et} \quad \lambda_2 = L_{s2} + B L_r$$

En introduisant (3.3) dans (3.5), on tire :

$$\Phi_r^* = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (3.8)$$

Chapitre III : Contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome

A partir de l'équation (3.6), on trouve :

$$L_m(i_{ds1} + i_{ds2}) = -(L_m + L_r)i_{qr} \quad (3.9)$$

En remplaçant (3.7) et (3.9) dans le système d'équations des tensions statoriques (2.17), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1}^* = R_{s1}i_{ds1} + L_{s1}\frac{d}{dt}i_{ds1} - \omega_s^*(L_{s1}i_{qs1} + \tau_r \cdot \phi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ V_{qs1}^* = R_{s1}i_{qs1} + L_{s1}\frac{d}{dt}i_{qs1} + \omega_s^*(L_{s1}i_{ds1} + \phi_r^*) \\ V_{ds2}^* = R_{s2}i_{ds2} + L_{s2}\frac{d}{dt}i_{ds2} - \omega_s^*(L_{s2}i_{qs2} + \tau_r \cdot \phi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ V_{qs2}^* = R_{s2}i_{qs2} + L_{s2}\frac{d}{dt}i_{qs2} + \omega_s^*(L_{s2}i_{ds2} + \phi_r^*) \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

$$\text{Avec : } \tau_r = \frac{L_r}{R_r} \text{ et } \omega_{gl}^* = \omega_s^* - \omega_r$$

En introduisant l'équation (3.6) dans (3.4), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r \cdot L_m (i_{qs1} + i_{qs2})}{L_m + L_r \phi_r^*} \quad (3.11)$$

A partir de la relation (3.2), on trouve :

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{p L_m \phi_r^*} \quad (3.12)$$

Le système d'équations électriques (3.10) montre que les tensions ($V_{ds1}^*, V_{qs1}^*, V_{ds2}^*, V_{qs2}^*$) influent au même temps sur les composantes des courants statoriques directes et en quadratures ($i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$).

Donc sur le flux et sur le couple. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage en définissant de nouvelles variables ($V_{ds1r}, V_{qs1r}, V_{ds2r}, V_{qs2r}$) n'agissant respectivement que sur ($i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$), tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1r} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{ds1} \\ V_{qs1r} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \frac{d}{dt} i_{qs1} \\ V_{ds2r} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{ds2} \\ V_{qs2r} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \frac{d}{dt} i_{qs2} \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

Afin de compenser l'erreur introduite lors de découplage, les tensions statoriques de références à flux constant sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{ds1}^* = V_{ds1r} - V_{ds1c} \\ V_{qs1}^* = V_{qs1r} + V_{qs1c} \\ V_{ds2}^* = V_{ds2r} - V_{ds2c} \\ V_{qs2}^* = V_{qs2r} + V_{qs2c} \end{cases} \quad (3.14)$$

Où :

$$\begin{cases} V_{ds1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ V_{qs1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ V_{ds2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ V_{qs2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (3.15)$$

➤ **Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse**

Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela est réalisable par un bloc de défluxage défini par la fonction non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \varphi_n \frac{\Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (3.16)$$

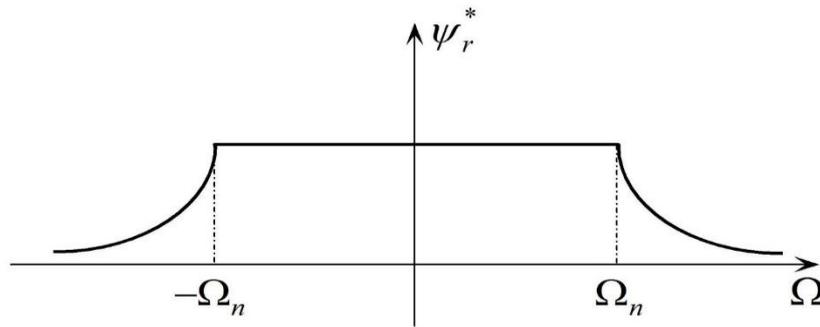


Fig III. 2 : Schéma de principe du défluxage [7]

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale, pour des vitesses rotorique inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine Ω_n. Pour des vitesses supérieures, le flux décroît lorsque la vitesse augmente afin de limiter la tension aux bornes de la machine.

Le schéma de réglage de la vitesse de la MASDE est donné par la figure (III.3).

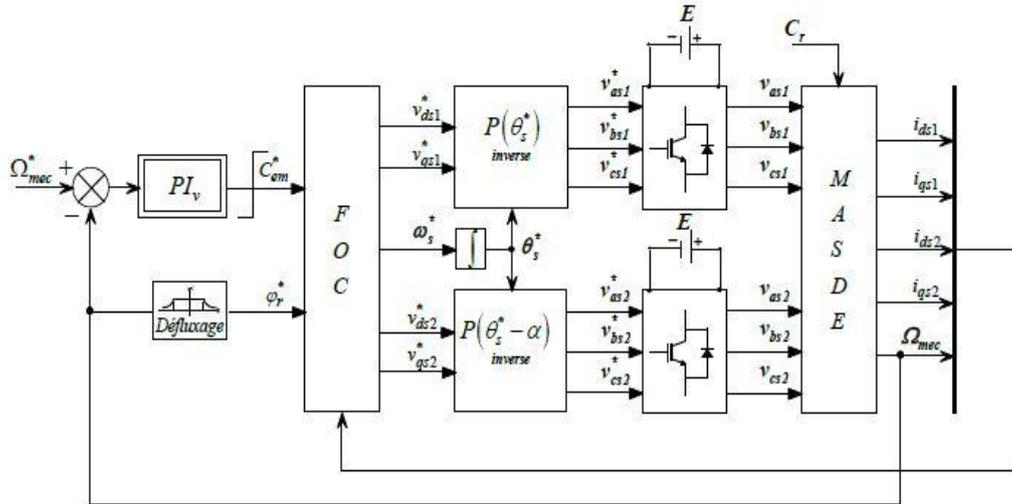


Fig III. 3 : Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse [7]

➤ Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure (III.4)

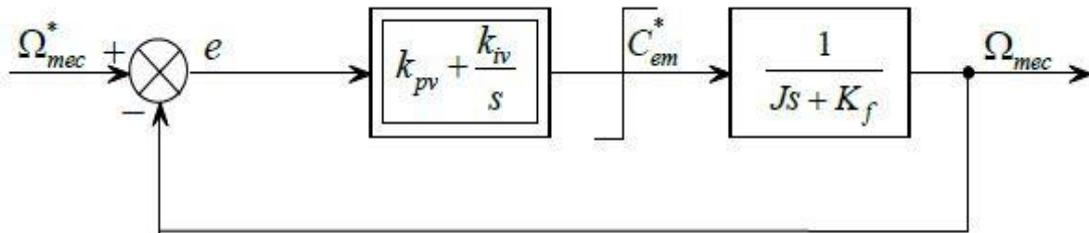


Fig III. 4 : Boucle de régulation de vitesse [35]

L'identification donne :

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{1}{\tau} \\ K_{iv} = \frac{K_f}{\tau} \end{cases} \quad (3.17)$$

On prend $\tau = \frac{\tau_r}{3}$

La commande doit être limitée par un dispositif de saturation définie par :

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* & \text{si } |C_{em}^*| \leq C_{em}^{max} \\ C_{em}^{max} \cdot \text{sign}(C_{em}^*) & \text{si } |C_{em}^*| \geq C_{em}^{max} \end{cases} \quad (3.18)$$

Le schéma bloc de découplage en tension (Field Oriented Control, FOC) est représenté sur la figure (III.5).

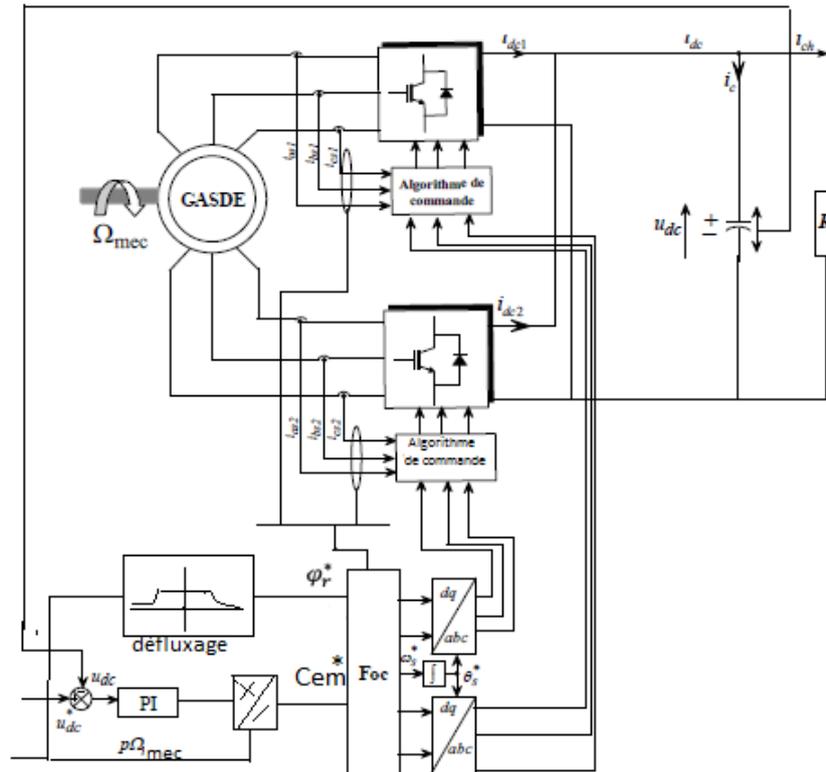


Fig III. 6 : Schéma du principe de la commande vectorielle à flux orienté appliqué à la GASDE en fonctionnement autonome [5]

III.3 Modélisation de la charge

III.3.1 Charge purement résistive

La charge résistive se compose de trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateur pour chacune des deux étoiles de la GASDE. La représentation schématique de la charge résistive selon l'axe d de l'étoile 1 est donnée par la figure (III.7).

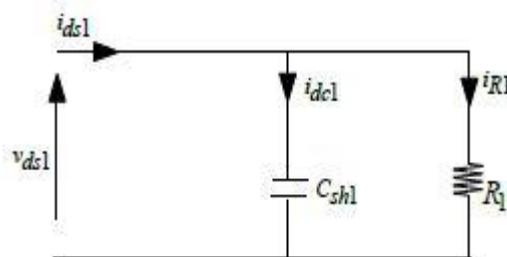


Fig III. 7 : Schéma représentatif de connexion de la charge selon l'axe de l'étoile 1

Le système d'équations suivant le référentiel de Park (d,q) est :

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds1}}{dt} = \left(\frac{1}{C_{sh1}}\right) \left(i_{ds1} - \frac{v_{ds1}}{R_1}\right) \\ \frac{dv_{qs1}}{dt} = \left(\frac{1}{C_{sh1}}\right) \left(i_{qs1} - \frac{v_{qs1}}{R_1}\right) \\ \frac{dv_{ds2}}{dt} = \left(\frac{1}{C_{sh2}}\right) \left(i_{ds2} - \frac{v_{ds2}}{R_2}\right) \\ \frac{dv_{qs2}}{dt} = \left(\frac{1}{C_{sh2}}\right) \left(i_{qs2} - \frac{v_{qs2}}{R_2}\right) \end{cases} \quad (3.19)$$

III.4 Simulation et interprétation des résultats

Le système global à étudier est constitué d'une GASDE connectée à deux onduleurs (à commande MLI) et commandée suivant la stratégie de la commande par orientation du flux rotoriques. Dans ce qui suit, un test de simulation est effectué afin d'analyser les performances de la commande : le test est consacré au comportement de la commande à vitesse variable et charge variable purement résistive, deux valeurs de charge sera appliqué R_1 et R_2 , avec $R_2 > R_1$.

La génératrice est entraînée à une vitesse de 314 rad/s avec une valeur de la tension redressée de référence $u_{dc}^* = 625V$ pendant toute la durée de simulation.

A l'instant $t=1.8s$, on insère une charge triphasée équilibrée purement résistive R_1 . A l'instant $t=2.5s$, on insère une autre charge purement résistive R_2 . La tension de bus continu suit la référence comme montré dans la figure (III.9). La figure (III.10) illustre l'allure de la puissance active qui atteint presque la valeur (-3KW). Le signe négatif implique que la puissance est fournie par la GASDE.

L'analyse des figures (III.11 – III.15) a permis de voir le comportement du couple électromagnétique, du courant et de la tension en fonction de la variation de la charge, où on remarque que la tension est insensible à cette variation, contrairement au courant et au couple électromagnétique.

A l'instant $t= [5-7] s$, la génératrice est entraînée à une vitesse de 345 rad/s, avec une même valeur de la tension redressée de référence $u_{dc}^* = 625V$ et avec une même charge R_2 , l'allure du couple, du courant et de tension demeure la même, par contre l'allure de la puissance électromagnétique est modifié de (-4KW) à (-5KW).

A l'instant $t = [7-10]$ s, l'entraînement de la GASDE est à vitesse de 280 rad/s, on remarque que seule l'allure de la puissance électromagnétique qui se varie et diminue à une valeur de (-3.5KW).

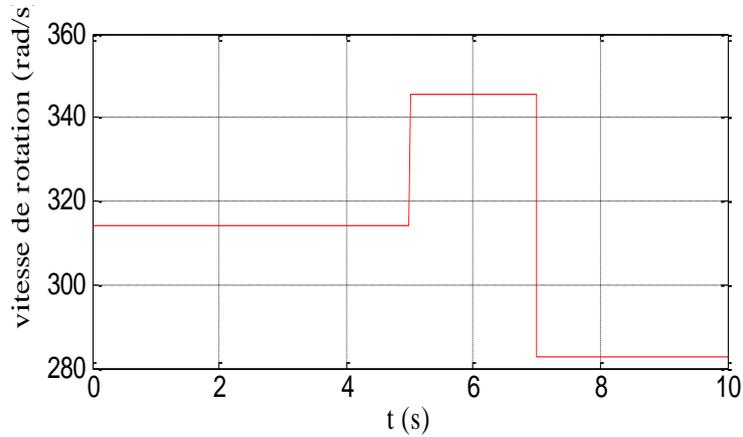


Fig III. 8 : Vitesse d'entraînement

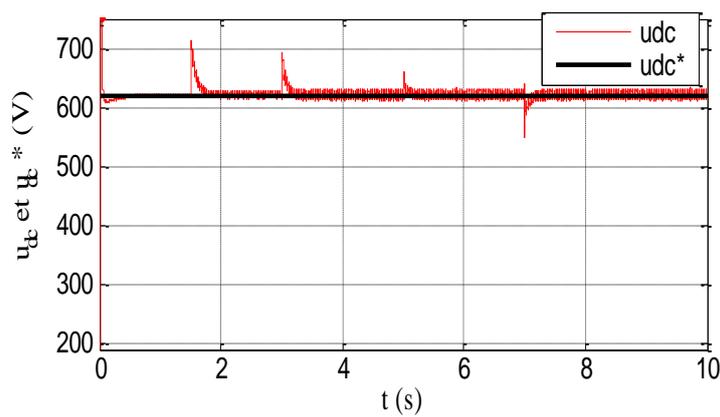


Fig III. 9 : Allure de la tension du bus continu

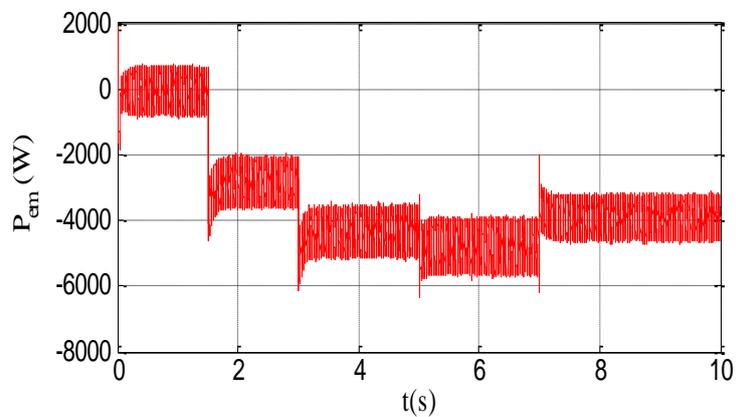


Fig III. 10 : Allure de la puissance électromagnétique

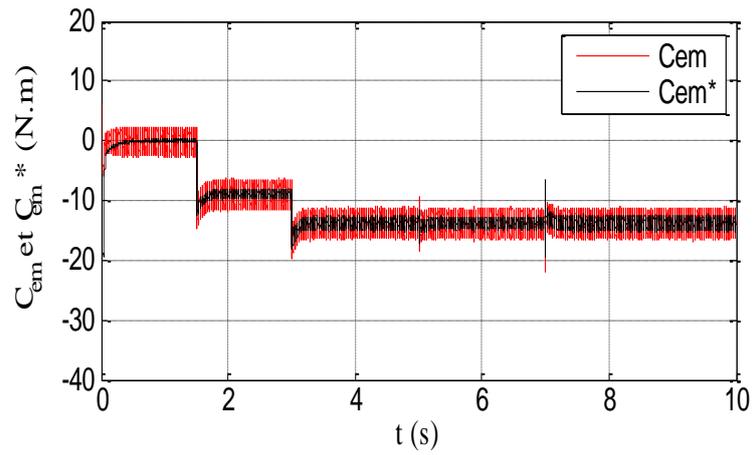


Fig III. 11 : Allure du couple électromagnétique

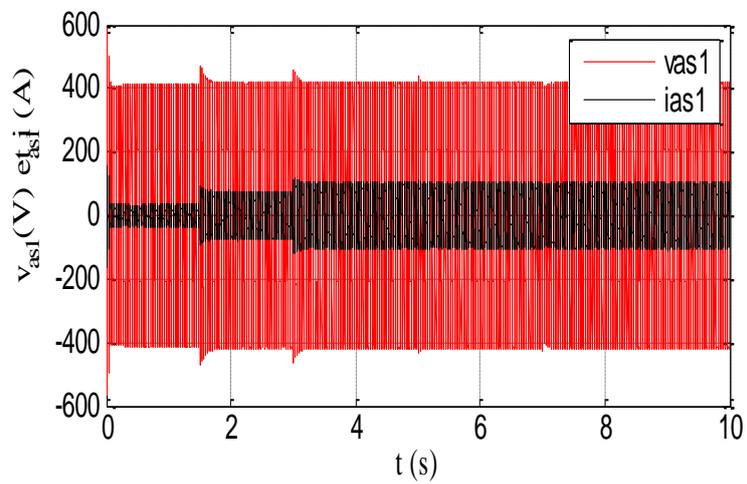


Fig III. 12 : Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1

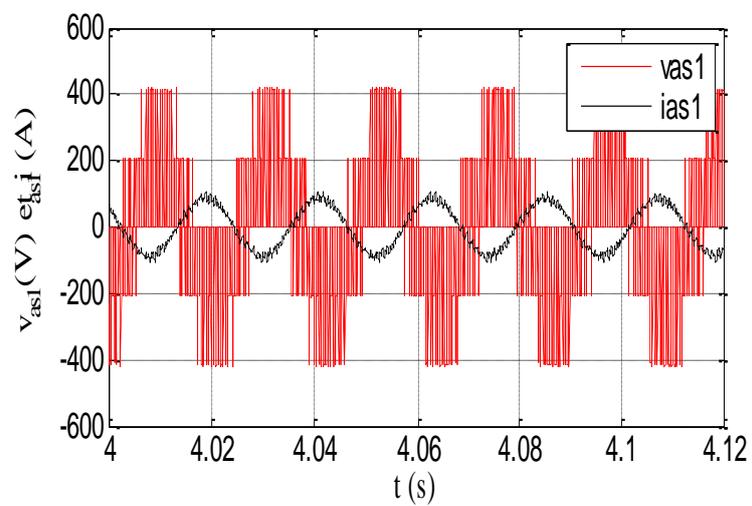


Fig III. 13 : Allure des courants et tensions statoriques de l'étoile 1

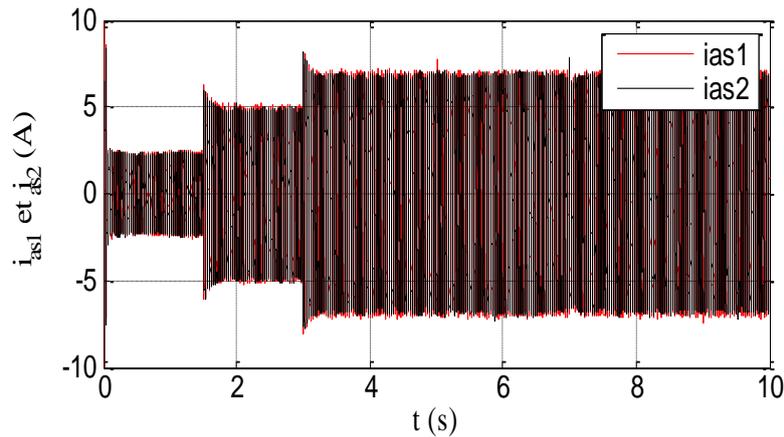


Fig III. 14 : Allure des courants statoriques des deux étoiles

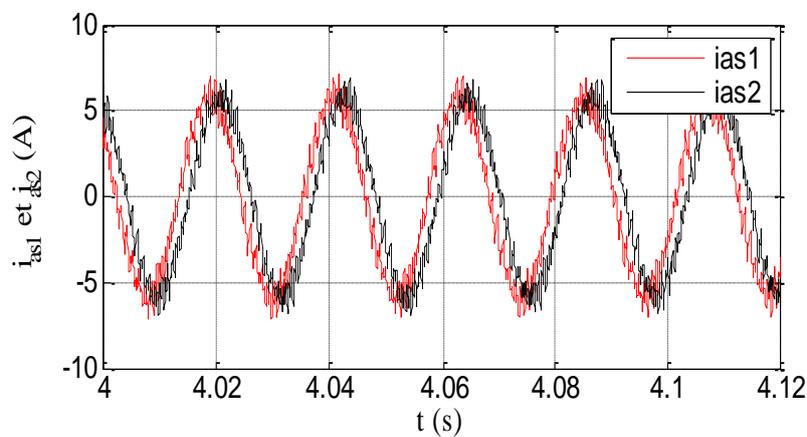


Fig III. 15 : Allure des courants statoriques des deux étoiles

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une structure de commande d’une génératrice asynchrone double étoile exploitée dans des systèmes autonomes. Nous avons présenté la description de cette dernière, en adoptant un modèle mathématique qui définit les différentes équations décrivant le fonctionnement de la machine.

La génératrice est connectée à un onduleur triphasé pour chaque étoile pour le contrôle de la tension en présence des variations de la charge, afin de procéder à la simulation de la machine asynchrone double étoile.

Les résultats de simulation obtenues et interprétées ont permis de déduire que la variation de la vitesse influence uniquement la puissance électromagnétique fournie par machine asynchrone double étoile à commande vectorielle.

Chapitre IV : Analyse des performances de la GASDE en mode dégradé

Introduction

Plusieurs types de défauts peuvent être confrontés dans un système de production d'énergie électrique, Par conséquent une défaillance d'un élément peut perturber ou causer l'arrêt total du système. L'analyse comportementale du système de production en défaut se fait avant l'élaboration d'une stratégie de fonctionnement et ceci dans le but d'avoir une idée sur leurs effets et impact, c'est pourquoi ce chapitre est consacré à l'étude et l'analyse de comportement des machines multiphasées en mode dégradé.

Nous présentons au début de ce chapitre les différents défauts qui peuvent apparaître dans un système de production d'énergie doté d'une machine multiphasées, ensuite nous présentons le comportement de la MASDE sous un défaut d'ouverture de phase statoriques. A la fin de ce chapitre nous allons interpréter les résultats de simulations.

IV.1 Présentation des différents défauts d'une chaîne de production multiphasée

Les différentes défaillances auxquelles un système électrique est exposé sont illustrées dans la figure, nous pouvons constater que ces défaillances peuvent être classées selon trois grandes familles :

- Défauts au niveau de la machine multiphasées ;
- Défauts au niveau du convertisseur ;
- Défauts de capteurs.

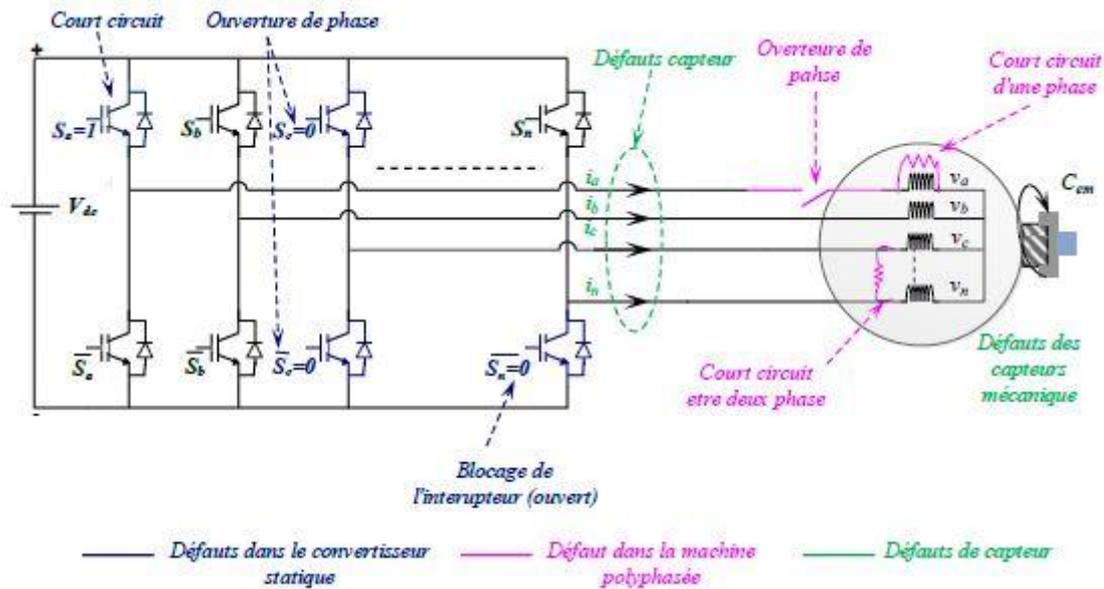


Fig IV. 1 : Différents défauts susceptible dans un système d’entraînement [44]

IV.1.1 Défaillance au niveau de la machine

De multiples défaillances peuvent apparaitre au niveau des machines asynchrones multiphasées, Ces défauts se répartissent en deux catégories électrique ou mécanique, et les causes sont très variées. Différentes études ont été réalisées pour étudier la fiabilité des moteurs asynchrone, Leurs performances et les défauts qui peuvent survenir. Les études statistiques de L’IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) et de L’EPRI (Electric Power Resarch Institute) pour les défauts moteurs asynchrones triphasés sont citées dans [39,43]. Ces statistiques d’apparition de défauts restent valables pour les machines multiphasées puisque c’est la même construction avec des légères différences de conception avec les machines triphasées classique. Les principaux défauts moteurs sont présentés dans le tableau.

Tableau IV. 1: Principaux défauts au nivrau des machines électriques

Etudier par	Défaut de roulement (%)	Défaut de statorique (%)	Défaut rotorique (%)	Autre défaut (%)
IEEE	42	28	8	22
EPRI	31	36	9	14

IV.1.1.1 Défauts statoriques

La majeure partie des défauts au stator des machines électriques proviennent du bobinage, et représentent un pourcentage de 36 selon l'étude de l'EPRI sur les défauts des machines asynchrones. Un bilan général sur les défauts statoriques des moteurs asynchrones, ainsi que leurs causes et effets [40], Notamment les différents défauts qui peuvent apparaître au niveau du bobinage de la machine sont :

- Ouverture de phase statorique ;
- Court-circuit partiel entre des spires de la même phase ;
- Court-circuit d'une phase, ou entre deux phases ou plus ;
- Court-circuit entre une phase et la masse

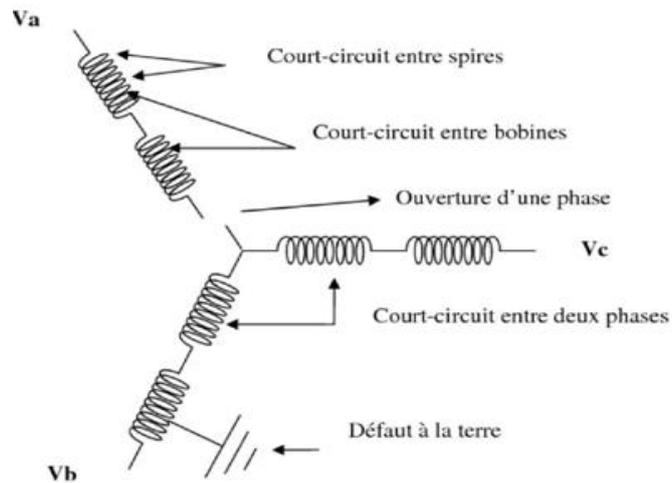


Fig IV. 2 : Illustration des différents défauts statoriques de la machine asynchrone

Une défaillance dans le bobinage statoriques peut apparaître à n'importe quel moment et avoir diverses origines. Ces origines peuvent être :

- Mécanique
- Electrique
- Thermique
- Environnement

IV.1.1.2 Défaut Rotoriques

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage d'écureuil ou au niveau des roulements. La cage d'écureuil d'un moteur à induction se compose de barres de rotor et d'anneaux d'extrémités. Si une ou plusieurs des barres sont partiellement fissurées ou complètement cassées, alors le moteur va avoir un défaut de barre cassé. Au niveau de la cage

les défauts se résument à la rupture des barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit.

On peut citer plusieurs défauts rotoriques :

- Rupture de barre ;
- Rupture d'anneaux ;
- Défauts de roulements ;

IV.1.2 Défaillances au niveau du convertisseur de puissance

Parmi les éléments constituant les systèmes d'entraînement électrique, le convertisseur de puissance est le moins fiable, parce que ses défauts représentent un pourcentage assez important d'environ 80% [41]. La figure montre que beaucoup de types de défauts peuvent apparaître dans les éléments constituant le convertisseur lui-même, tels que les composants semi-conducteurs de puissance, les capacités de bus continu, les circuits d'alimentation, etc. Les défauts des interrupteurs de puissance dans un convertisseur statique sont classés en deux types : défauts de type court-circuit et les défauts de type circuit-ouvert.

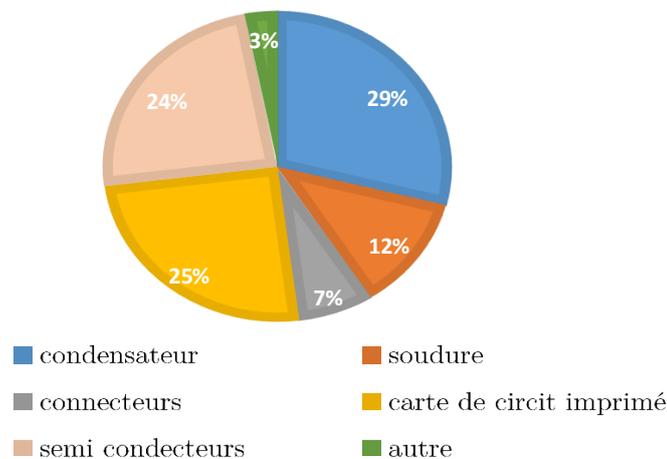


Fig IV. 3 : Répartition des défaillances dans les convertisseurs de puissance [44]

IV.1.2.1 Défauts de type court-circuit

Le défaut de type court-circuit figure (IV.4) d'un interrupteur apparaît quand l'un des deux interrupteurs reste continuellement à l'état passant. Le court-circuit se produit lorsque le deuxième interrupteur est à son tour commandé à la fermeture. Ce défaut se produit en raison d'une défaillance de la commande des transistors (défaillance du driver, défaillance de la carte de commande, problème de connexion entre la carte de commande et le driver) [41], ou suite à une défaillance physique de la puce de silicium qui résulte d'un dépassement de la température et c'est le mode de défaillance le plus probable et le plus courant.

IV.1.2.2 Défaut de type circuit ouvert

Un défaut simple de type interrupteur-ouvert figure (IV.4) se traduit généralement par une perte totale ou partielle du fonctionnement de l'un des interrupteurs de puissance constituant le convertisseur statique, il se produit en raison d'une défaillance de grille ou une coupure d'un fil de liaison avec le transistor, cette coupure peut être causée par un défaut court-circuit, ou un courant de collecteur extrêmement élevé. [41]

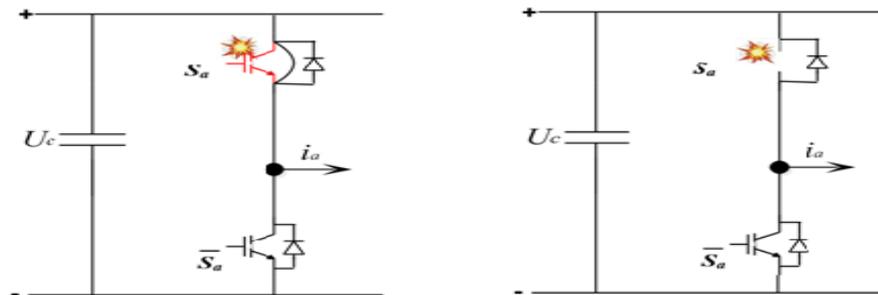


Fig IV. 4 : Différents types de défaut d'un bras d'onduleur de tension [44]

IV.1.3 Défaillance au niveau des capteurs

Les défaillances d'origines instrumentales sont nécessairement liées aux capteurs électriques et mécaniques. Ils sont prépondérants suivant l'application désirée et ont des effets nuisibles sur tout le système d'entraînement, or les principaux défauts sont [42] :

- Destruction des capteurs ;
- Mesures erronées ;
- Dérive de la mesure ;
- Ouverture des boucles de régulation et de contrôle, perte des limitations de certains grandeurs (courants, couple).

IV.1.4 Comportement de la MASDE en mode dégradé

Cette section sera consacrée à l'étude du comportement de MASDE en mode dégradé, où le défaut étudié est le défaut d'ouverture d'une ou plusieurs phases statoriques. Le défaut d'ouverture de phase statoriques est assez rencontré dans la chaîne de conversion d'un système d'entraînement électrique. Ce défaut peut être représenté comme une rupture totale du bobinage statoriques d'une phase, ouverture de la ligne entre le convertisseur de puissance et la machine, ou par un défaut de circuit ouvert des interrupteurs de puissance de même bras d'onduleur. Le défaut d'ouverture de phase est caractérisé principalement par l'annulation du courant de la phase en défaut [44].

Avant de passer à l'étude du comportement de la MASDE en présence de défaut nous devons effectuer une modélisation de la MASDE dans la base naturelle, puisqu'il est très utile pour l'étude et l'analyse des défauts. Cette approche permet de simuler toutes sortes de défauts d'ouvertures de phases statoriques en ne modifiant que les paramètres de la machine (résistances et inductances), sans ajouter des composants non réels, et ce modèle permet d'établir un modèle unique de l'entraînement valable en mode normal et en mode dégradé [43], sans faire appel à des modèles différents pour chaque mode. La simulation de ce type de défaut consiste à modéliser la machine dans la base naturelle avec un fonctionnement sain, puis nous introduisons une résistance très élevée en série (R_{sd}) avec la phase en défaut, dont l'objectif est d'annuler le courant traversant la phase défectueuse. Avec cette approche, plusieurs défauts peuvent être simulés simultanément.

D'après les équations des tensions des deux étoiles et du rotor représentées dans le chapitre 2 dans l'équation (2.1) et en remplaçant les équations magnétiques (2.6) dans (2.1), on aura : [44]

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [R_{sd1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [L_{11}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} ([L_{12}][i_{s2}] + [L_{1r}][i_r]) \\ [v_{s2}] = [R_{sd2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [L_{22}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} ([L_{12}]^t[i_{s1}] + [L_{2r}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [L_r][i_r] + \frac{d}{dt} ([L_{1r}]^t[i_{s1}] + [L_{2r}]^t[i_{s2}]) \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Comme les inductances statoriques des deux étoiles et rotoriques ne dépend pas du temps mais de théta (θ_r), on établit un changement de variable, d'où l'équation (4.1) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [R_{sd1}][i_{s1}] + [L_{11}] \frac{d}{dt} [i_{s1}] + [L_{12}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{1r}][i_r] + [L_{1r}] \frac{d}{dt} [i_r] \\ [v_{s2}] = [R_{sd2}][i_{s2}] + [L_{22}] \frac{d}{dt} [i_{s2}] + [L_{21}] \frac{d}{dt} [i_{s1}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{2r}][i_r] + \frac{d}{dt} [L_{2r}][i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta_r} [L_{1r}]^t[i_{s1}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{2r}]^t[i_{s2}] \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} [i_{s1}] = [L_{1,1}]^{-1} \left([v_{s1}] - [R_{s1}][i_{s1}] - \frac{d}{dt} ([L_{1,2}][i_{s2}] + [M_{1,r}][i_r]) - \omega_r \frac{\partial}{\partial \theta_r} [M_{1,r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt} [i_{s2}] = [L_{2,2}]^{-1} \left([v_{s2}] - [R_{s2}][i_{s2}] - \frac{d}{dt} ([L_{2,1}][i_{s1}] + [M_{2,r}][i_r]) - \omega_r \frac{\partial}{\partial \theta_r} [M_{2,r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_r]^{-1} \left(-[R_r][i_r] - \frac{d}{dt} ([M_{1,r}][i_{s1}] + [M_{2,r}][i_{s2}]) - \omega_r \frac{\partial [i_r]}{\partial \theta_r} ([M_{1,r}] + [M_{2,r}]) \right) \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Les dérivées des inductances mutuelles entre la première étoile avec le rotor $\frac{d}{d\theta_r}[L_{1r}]$, et entre la deuxième étoile avec le rotor $\frac{d}{d\theta_r}[L_{2r}]$ sont données comme suite :

$$\frac{d}{d\theta_r}[L_{1r}] = -L_{sr}\omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\frac{d}{d\theta_r}[L_{2r}] = -L_{sr}\omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Pour cela on reprend le modèle de la MASDE développé (équation 4.3) et on introduit la résistance R_{sd} modélisant de défaut en série avec la résistance statoriques, ce qui donne le système d'équation suivant : [44]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[i_{s1}] = [L_{1,1}]^{-1} \left([v_{s1}] - ([R_{s1}] + [R_{sd}])[i_{s1}] - \frac{d}{dt}([L_{1,2}][i_{s2}] + [M_{1,r}][i_r]) - \omega_r \frac{\partial}{\partial \theta_r}[M_{1,r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_{s2}] = [L_{2,2}]^{-1} \left([v_{s2}] - ([R_{s2}] + [R_{sd}])[i_{s2}] - \frac{d}{dt}([L_{2,1}][i_{s1}] + [M_{2,r}][i_r]) - \omega_r \frac{\partial}{\partial \theta_r}[M_{2,r}][i_r] \right) \\ \frac{d}{dt}[i_r] = [L_r]^{-1} \left(-[R_r][i_r] - \frac{d}{dt}([M_{1,r}][i_{s1}] + [M_{2,r}][i_{s2}]) - \omega_r \frac{\partial [i_r]}{\partial \theta_r} ([M_{1,r}] + [M_{1,r}]) \right) \end{cases} \quad (4.6)$$

Tel que :

$$[R_{sd}] = \begin{bmatrix} r_{sd} & 0 & 0 \\ 0 & r_{sd} & 0 \\ 0 & 0 & r_{sd} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Nous nous intéressons à quatre cas différents de défauts d'ouverture de phase, au niveau de la MASDE, tel que :

- i*) D_1 Ouverture d'une phase statorique ;
- ii*) D_2 Ouverture de deux phases statoriques.

IV.2 Simulation et interprétation des résultats

Afin d'étudier le comportement de la MASDE en présence d'un défaut d'ouvertures des phases statoriques, nous effectuons une série de simulations sous l'environnement Matlab/Simulink®, avec les paramètres de la MASDE donnés en annexe.

Lors d'ouverture d'une phase, le courant qui la traverse s'annule ce qui provoque une augmentation des courants des autres phases, avec des amplitudes déséquilibrées. De ce fait le déséquilibre de courant va provoquer l'apparition des ondulations de couple d'un taux 31.68% et de vitesse mécanique avec détérioration du rendement et augmentation des pertes Joule statoriques, comme illustré sur les figures (IV.5-IV.10). Pour une phase ouverte, la valeur moyenne du couple ne décroît que de 3.3% par rapport à la valeur du couple au fonctionnement sain, ce qui est logique car les amplitudes des courants des phases saines ont augmenté (Figure.IV.9) pour compenser la chute du couple moyen. De plus l'apparition des ondulations de couple avec un taux de 34.13% (Figure.IV.5). Ce qui induit une diminution de 2.23% du rendement de la MASDE comme illustré dans la figure.IV.7.

Nous constatons qu'avec l'ouverture des deux phases (D_2), les performances de la machine ont encore diminuées par rapport au fonctionnement avec une seule phase ouverte (D_1), les courants statoriques des phases saines ont considérablement augmentés par rapport à l'ouverture d'une seule phase, comme illustré par la figure (IV.10), et cette augmentation engendre des pertes Joules supplémentaires qui nuisent au rendement ce que nous pouvons le voir sur la figure (IV.8). De plus on constate une augmentation des ondulations du couple dans le cas de défaut d'ouverture de deux phases 20% par rapport à l'ouverture d'une seule phase statorique.

Nous remarquons aussi que le déséquilibre de la machine est plus important lors de l'ouverture des deux phases (D_2) par rapport à une phase (D_1). Ce cas de défaut est très dangereux pour la MASDE, puisqu'il peut conduire à la perte de la machine ou l'apparition d'autres types de défauts, vu les grandes vibrations mécaniques d'une part, et une grande augmentation de température au niveau de la machine d'autre part.

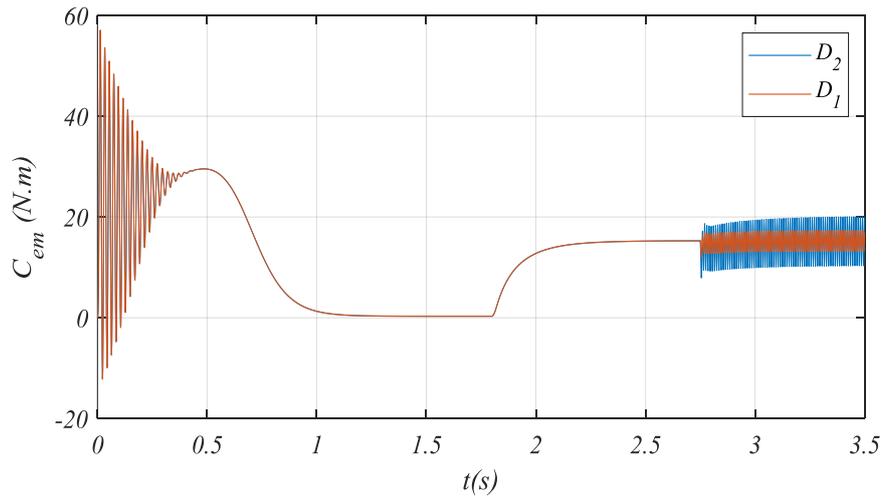


Fig IV. 5 : Couple électromagnétique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phase

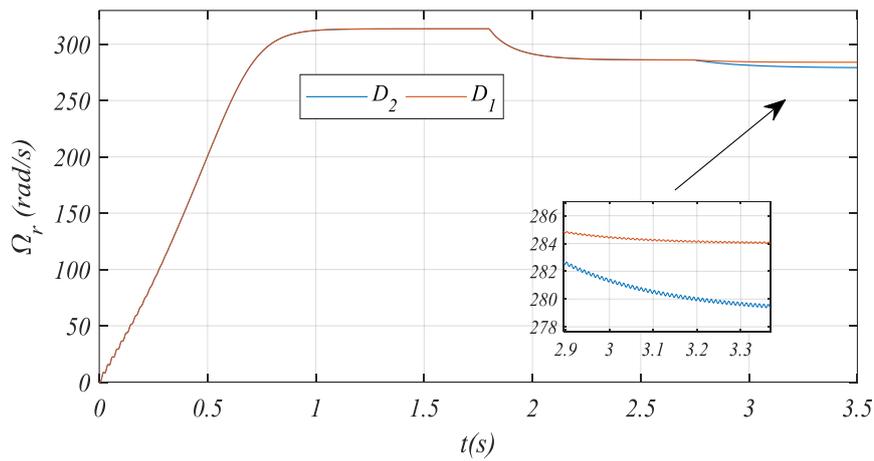


Fig IV. 6 : Vitesse mécanique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases

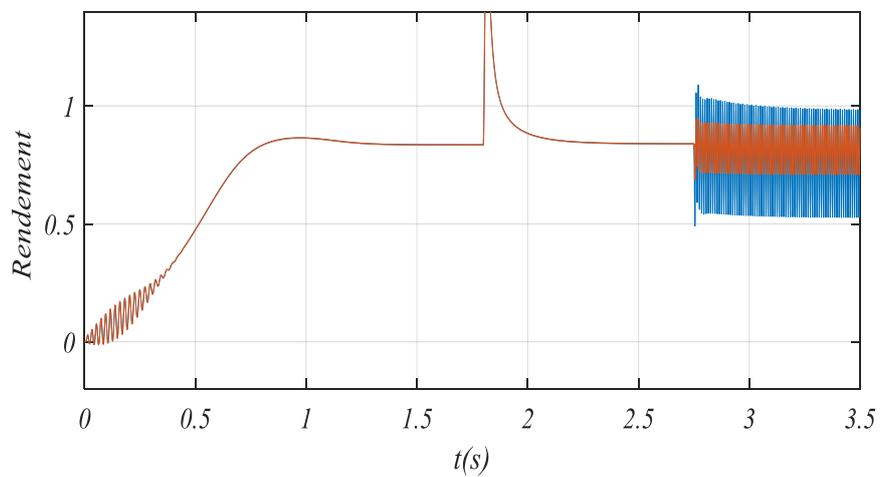


Fig IV. 7 : Rendement de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases

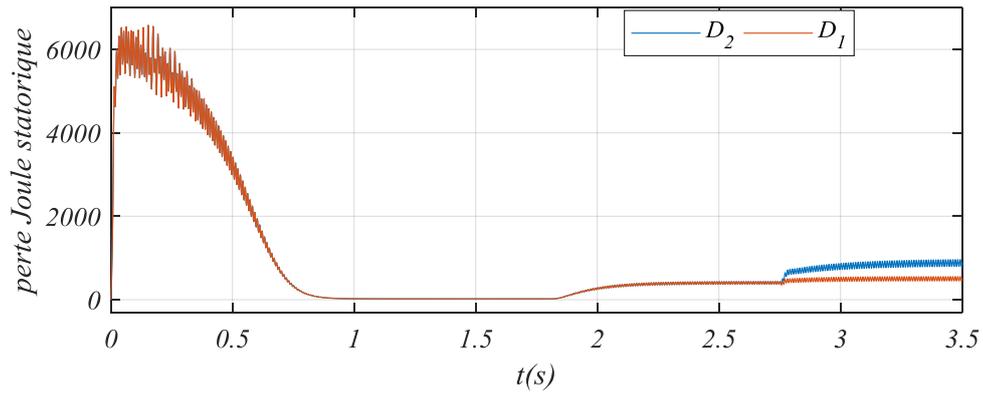


Fig IV. 8 : pertes Joule statorique de la MASDE sous les différents défauts d'ouverture de phases

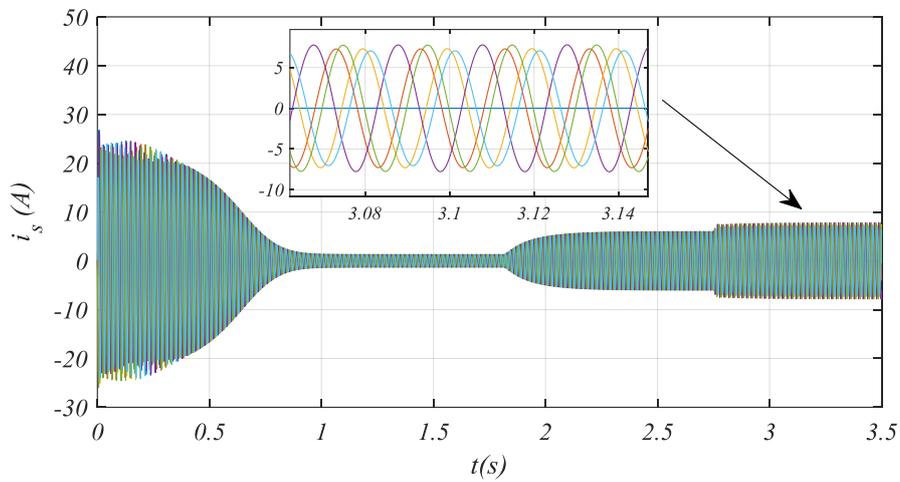


Fig IV. 9 : Courant statorique de la MASDE lors défauts d'ouverture d'une phase statorique

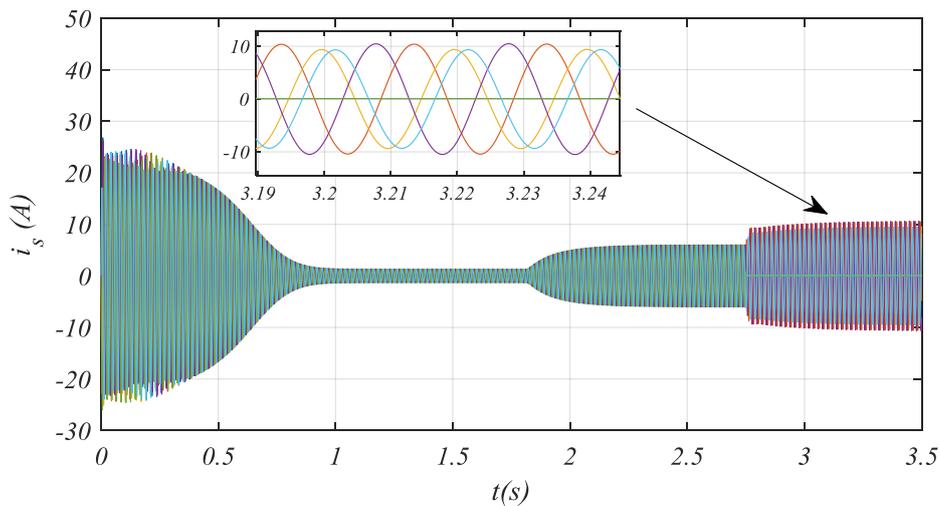


Fig IV. 10 : Courant statorique de la MASDE lors défauts d'ouverture de deux phase statoriques

Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation et l'analyse du comportement de la MASDE lors du fonctionnement en mode dégradé a été étudiée. En premier lieu, les différents défauts qui sont susceptibles de se produire dans un système d'entraînement multiphasées ont été présentés. Des modèles uniques de l'entraînement valable en fonctionnement sain et en présence du défaut d'ouverture de phase statorique pour la MASDE a été développés, ce qui a permis d'étudier les différents défauts d'ouverture de phases statorique. Les résultats de simulation montrent la continuité de fonctionnement des machines multiphasées lors d'un défaut d'ouverture de phase statorique, mais bien sûr avec des performances dégradées, suivie toujours d'un déséquilibre des courants statoriques des phases saines, ce qui provoque l'apparition des ondulations de couple et l'augmentation des pertes Joule statoriques. Les performances des machines se dégradent plus lors d'ouverture de plusieurs phases statoriques, ce qui engendre plus d'ondulation de couple et de pertes Joule statorique ce qui peut conduire à la perte de la machine.

Conclusion générale

La contribution à l'analyse et le contrôle de la machine asynchrone double étoile, en fonctionnement moteur d'une part, et en fonctionnement génératrice intégrée dans un système autonome de l'autre part, tel est l'objectif principal de ce mémoire de fin d'étude.

Le premier chapitre a été consacré pour les généralités sur les différents systèmes autonomes et les machines utilisées dans la production d'énergie électrique dedans. Ce qui nous a orientés vers le choix de la machine asynchrone double étoiles. On l'a exploité dans le cas d'un système autonome, vue sa fiabilité et sa robustesse. En effet, la MASDE est devenue une solution concurrente à la génératrice ordinaire.

Le second chapitre était dédié à la description et à la modélisation de la MASDE. Le modèle mathématique de cette machine est présenté en adoptant certaines hypothèses simplificatrices, cette étude a permis de valider le modèle de la MASDE proposé en fonctionnement génératrice autonome.

Ensuite, on a abordé dans le troisième chapitre le contrôle de la GASDE intégrée dans un système autonome. Après avoir présenté un modèle de simulation. Dans le but d'appliquer les machines asynchrones double étoiles dans le système autonome.

L'application d'une stratégie de la commande vectorielle de la GASDE débitant sur un réseau autonome en se basant sur le principe de l'orientation du flux rotorique. L'évolution du système pour une variation de la charge est testée sur différentes charges purement résistives.

La modélisation et l'analyse du comportement de la MASDE lors du fonctionnement en présence de défauts a été étudié dans le quatrième chapitre, après une présentation de différents défauts qui sont susceptible de se produire dans le système étudié, des valeurs de charge sont appliquées en présence de défauts d'ouverture de phase statorique.

L'analyse des résultats obtenus nous a permis de conclure sur la sensibilité et la dégradation des performances de production en mode dégradé, notamment la puissance électromagnétique, des perspectives de recherche et de réalisations pratiques intéressantes pouvant contribuées à mieux exploiter la machine sont envisageables :

- Utilisation des onduleurs multi-niveaux.
- Application d'autres techniques de commande robuste.
- Analyser d'autres défauts susceptibles d'apparaître au niveau de la machine.

Tableau des paramètres de la MASDE

Puissance nominale	$P_n=4.5KW$
Tension nominale	$V_n=220V$
Vitesse nominale	$N_n =3000tr/mn$
Fréquence nominale	$f_s=50Hz$
Résistances d'une phase statoriques (étoile 1 et 2)	$R_{s1}=R_{s2}=3.72\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r=2.12\Omega$
Inductances de fuites d'une phase statoriques (étoiles 1et2)	$L_{s1}=L_{s2}=0.022H$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r=0.006H$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$L_m=0.3672H$
Moment d'inertie	$J=0.0625 \text{ kg .m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f=0.001N.m.s/rd$
Nombre de paires de pôles	$P=1$
Puissance apparente de la charge	$5.8KVA$
Facteur de puissance	0.68

BIBLIOGRAPHIE

- [1] History of Electricity by Rochelle Forrester Second Edition 201
- [2] Chapter 1 - History of Electricity Ayşe Kübra Erenoğlu, OzanErdoğan, AkınTaşcıkaraoğlu, Pathways to a Smarter Power System, 1-27, 2019.
- [3] M.Hook a,n, Xu Tang b. «Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change-A review Energy- policy» 52 (2013), 797-809.
- [4] S.Busquet. «Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque. »
- [5] S. Chekkal, «Intégration des Génératrices Asynchrones à Double Etoiles dans un Système Eolien», Thèse Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie 2015.
- [6] B. Multon, «Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable», Revue 3E.I, No. 3, pp. 3–8,1995.
- [7] H. AMIMEUR, “Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile” Thèse de Doctorat à l'université de Batna, Algérie, 2012.
- [8] S.Busquet. Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque. Un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Par.
- [9] L .Hama, M.Kekouche «Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile» mémoire de fin de cycle, université de bejaia, 2014. Is, 2003. Français.NNT : 2003ENMP1195, pastel-00001338.
- [10] D. Seyoum, M. F. Rahman et C. Grantham ,« Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control », applied power electronics conference and exposition (APEC'03), eighteenth annual IEEE, vol. 2, miami beach, 2003.
- [11] F. A. Farret, B. Palle et M. G. Simoes– « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electr, power appl, 2005.
- [12] O. Gergaud, B. Multon et H. Ben Ahmed – « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance », électrotechnique du futur, nancy, 2001.

- [13] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de Doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, centre de bordeaux, 2003.
- [14] K. Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », thèse de doctorat en électrotechnique. Université de béjaia, 2010.
- [15] A. Maafa, «Etude d'un générateur éolien basé sur la cascade de deux machines asynchrones piloté par un convertisseur de fréquence, Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 2011.
- [16] B. TOUAL « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [17] E. Merabet «Amélioration des Performances de Régulation d'une Machine Asynchrone Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université de Batna. 2013.
- [18] E. A. Klingshirn, «High phase order induction motors-part 2-experimental results. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1983. vol. PAS-102, no. 1 : p. 54-59.
- [19] G.K.Singh, «Multi-phase induction machine drive research —a survey» electric power systems research 61(2002) 139-147.
- [20] A.Nanoty, A. R. Chudasama, « Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor» International Journal of Electromagnetics and Applications 2012, 2(5): 77-84, DOI: 10.5923/j.ijea.20120205.01.
- [21] R.Abdesmed, « Modélisation et simulation des machines électriques», Editeur : Ellipses Marketing, Date de parution : 24/05/11.
- [22] J.Jean, Beziane (18 Nov.2012) – L'énergie solaire.
- [23] D.Hadiouche, «Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure», thèse de doctorat, Univ Henri Poincaré, Nancy-I, France, décembre 2001.

- [24] P. N.Hamidreza, Pooya D, Abbas.S «A novel structure for vector control of symmetrical six-phase Induction machines with three current sensors». ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 1, No. 2, 2011, 23-29.
- [25] E.Merabet, «Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile» mémoire de magister en électrotechnique, Univ de Batna, 2008.
- [26] Z.Benaissa&S.Benneni, «Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile». Mémoire d'ingénieur d'état, Univ de M' sila, 2008.
- [27] Z.Bouguerra, «Commande de la machine asynchrone double étoile» mémoire de master en automatique, Univ de M'sila, 2012.
- [28] D.Hadiouche, «Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure», thèse de doctorat, Univ Henri Poincaré, Nancy- I, France, décembre 2001.
- [29] X. Kestelyn, «Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasés», PhD Thesis, Université Lille 1 - Sciences et Technologies, December 2003.
- [30] F. Barrero, M.R. Arahal, R. Gregor, S. Toral and M.J. Duran, «One-Step Modulation Predictive Current Control Method for the Asymmetrical Dual Three-Phase Induction Machine, IEEE Transactions on Industrial Electronics», vol. 56, no. 6, pp. 1974-1983, June 2009.
- [31] L. Benalia «Commande En Tension Des Moteurs A Induction Double Alimentes», Thèse de doctorat, Université De BATNA, 2010.
- [32] M. Bouziane, «Application des techniques intelligentes à la commande d'une machine asynchrone double étoile associée à un convertisseur matriciel», Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2014.
- [33] L. Baghli, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques», Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, France, 1999.
- [34] S. N. Vukosavic a, M. Jones a, E. Levia,*, J. Vargab, «Rotor flux oriented control of a symmetrical six-phase induction machine», Electric Power Systems Research, pp 142-152, 2005.

- [35] 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.
- [36] N. Madani, «Commande A Structure Variable D'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée Par Deux Onduleurs MLI», thèse de doctorat, université de Nantes France, 2004.
- [37] B. Kiyyour «commande vectorielle de la machine à réluctance variable à stator lisse et rotor massif». Mémoire de magistère, université de Batna, 2004.
- [38] Iqbal, A., Levi, E., Jones, M., and Vukosavic, S.N : «Generalised sinusoidal PWM with harmonic injection for multi-phase VSIs'. Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.PESC», Jeju, Korea, 2006, pp. 2871–2877.
- [39] G. K. Singh, Al kazzaz, «Induction machine drive condition moniloring and diagnostic research a survey Electric Power System» Res 64(2):145-158 2003.
- [40] A. Siddique, G.S Yadava, B.Singh, «A review of stator fault montoring techniques of induction motors». IEEE Trans Energy Convers 20(1):106-114,2003.
- [41] T. Orłowska-Kowalska, F.Blaabjerg, J.Rodriguez, «Advanced and intelligent control in power electronics and drives», book chapter Springer, 2014.
- [42] K. Iffouzar «Etude et Contrôle des Machines Asynchrones Polyphasées en Mode normal et Dégradé. Application dans un système Embarqué », Thèse de Doctorat de l'université de Bejaia, Algérie, 2016.
- [43] L.Khaldi, K.Iffouzar, K. Ghedamsi, D. Aouzellag, «Performance analysis of five-phase induction machine under unbalanced parameters», Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol.52, No. 5, pp. 521-526, (2019).
- [44] L.Khaldi, «étude et commande des architectures de convertisseur statique AC/AC tolérantes aux défauts associé à une génératrice polyphasée». Thèse doctorat, univ Bejaïa, 2021.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est l'analyse des performances d'une génératrice asynchrone double étoile dans un système autonome en fonctionnement normal, et en présence de défaut.

Dans un premier temps nous avons présentés des généralités sur les systèmes autonomes ainsi que les machines utilisées dans ces systèmes, ensuite on s'est intéressé à la modélisation de la machine asynchrone double étoile (MASDE).

Après avoir fait la modélisation et le contrôle de la GASDE en fonctionnement autonome, Nous avons présenté les différentes méthodes de la commande vectorielle et l'influence de la charge purement résistive sur les performances de la GASDE. Enfin une analyse de l'impact de défauts d'ouverture de phases statorique sur le comportement d'un système de production en fonctionnement autonome.

Les résultats obtenus ont permis de conclure sur la sensibilité et la dégradation des performances de production d'électricité en mode dégradé, notamment le couple électromagnétique et la puissance électromagnétique de la machine asynchrone double étoile.

Mots clés : Machine asynchrone double étoile, Modélisation, Commande, Autonome, Normal, Performance, Défauts, Dégradé.