

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA de Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Projet de fin d'étude

Dans le cadre de :

L'obtention d'un diplôme de master en électrotechnique

Option : Réseaux électriques

THEME :

**Etude et Contrôle d'une Chaîne de Conversion d'Energie
Electrique à Base de la Machine Asynchrone Double Etoile**

Réalisé par :

Mr. TOUCHE Khaled

Mr. ZINET Locif

Encadré par :

M^{me}: S.CHEKKAL

Mr: D.AOUZELLAG

Année Universitaire 2016/2017

REMERCIEMENTS

*A notre promotrice et encadreur Mme **CHEKKAL SAMIRA** Docteure à l'université de Bejaia Département GE et à Monsieur **AOUZELLAG DJAMAL**, Professeur à l'université de Bejaia. Vous avez bien voulu nous confier ce travail riche d'intérêt et nous guider à chaque étape de sa réalisation, Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil malgré vos obligations professionnelles*

Nous saisissons cette occasion pour vous exprimer notre profonde gratitude tout en vous témoignant notre respect

*A nos professeurs et membres de jury Mr **K. GHEDAMSI** et Mme **BENDAHMANE***

Vous nous faites l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité de siéger parmi notre jury.

Veillez accepter ce travail maitre, en gage de notre grand respect et notre profonde reconnaissance

En fin nous exprimons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'élaboration de ce travail

Dédicaces

*Je remercie « **ALLAH** » le tout puissant qui nous a procuré du courage et de la
volonté pour mener à terme ce modeste travail*

Que je dédie

*A mes très chers parents, je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre
amour, votre patience et vos innombrables sacrifices*

*Que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie, afin que je puisse à
mon tour vous combler*

A mes chers grands parents

A mes chers frères et ma sœur et sa famille

A mes chers cousins et leurs familles

A mon ami et binôme Locif et à sa famille

A tout mes ami(e)s

*A ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin
d'étude et je n'oublierai pas autant, tous ceux qui sont absents sur cette feuille
mais toujours présents dans mon cœur.*

Khased

Dédicaces

*Je remercie « ALLAH » le tout puissant qui nous a procuré du courage et de la
volonté pour mener à terme ce modeste travail*

Que je dédie

*A mes très chers parents, je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre
amour, votre patience et vos innombrables sacrifices*

*Que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie, afin que je puisse à
mon tour vous combler*

A mes chers grands parents

A mes chers frères et ma sœur et sa famille

A mes chers cousins et leurs familles

A mon ami et binôme Khaled et à sa famille

A tout mes ami(e)s

*A ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin
d'étude et je n'oublierai pas autant, tous ceux qui sont absents sur cette feuille
mais toujours présents dans mon cœur.*

Locif

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électriques utilisées dans les systèmes autonomes

Introduction Générale.....	1
I.1 Introduction	2
I.2 Histoire des machines électriques.....	2
I.3 Description des systèmes autonomes.....	3
I.4 Quelques types des systèmes autonomes.....	3
I.4.1 Systèmes photovoltaïque.....	3
I.4.2 Groupe électrogène.....	4
I.4.3 Générateur éolien.....	6
I.4.4 Système hydraulique.....	6
I.4.5 Pile à combustible.....	7
I.5 Machines électriques utilisées pour la conversion électromécanique.....	8
I.5.1 Cas des systèmes connectés aux réseaux.....	8
I.5.1.1 Systèmes de production à vitesse fixe.....	8
I.5.1.2 Systèmes de production à vitesse variable.....	8
I.5.2 Cas des systèmes en fonctionnement isolé et autonome.....	10
I.5.3 Machines multiphasées.....	11
I.6 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone double étoile.....	12
I.6.1 Avantages.....	12
I.6.2 Inconvénients.....	13
I.7 Quelques technologies de commande et applications de la GASDE.....	14
I.8 Conclusion.....	15

Chapitre II : Modélisation de la MASDE

II.1 Introduction.....	16
II.2 Description de la machine asynchrone double étoile.....	16
II.3 Hypothèses simplificatrices.....	16
II.4 Modèle de la MASDE.....	17
II.4.1 Représentation de la machine.....	17
II.4.2 Equations électriques	18
II.4.3 Equations magnétiques.....	19
II.4.4 expression du couple électromagnétique.....	21
II.4.5 Equation mécanique.....	21
II.5 Modèle biphasé de la MASDE.....	22
II.5.1 Transformation de Park.....	22
II.5.2 Modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q).....	22
II.5.2.1 Choix du référentiel.....	23
II.5.3 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes (d, q)	24
II.5.4 Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	26
II.6 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI.....	27
II.6.1 Modélisation de l'onduleur de tension	27
II.6.2 Stratégie de commande sinus-triangle.....	29
II.6.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	30

II.7 Simulation et interprétation des résultats.....	31
II.8 Conclusion.....	33

Chapitre III : Contrôle et analyse de la chaine de production à base de la MASDE

III.1 Introduction.....	34
III.2 Principe de la commande vectorielle.....	34
III.3 Choix d'orientation du flux	35
III.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle.....	36
III.4.1 Méthode de commande directe.....	36
III.4.2 Méthode de commande indirecte.....	37
III.5 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse.....	37
III.5.1 Identification des paramètres des régulateurs PI	39
III.5.2 Application de la commande indirecte sur la MASD.....	41
III.6 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse.....	43
III.6.1 Identification des paramètres du régulateur de vitesse.....	44
III.7 Simulation et interprétation des résultats.....	44
III.8 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57

Liste des figures

Fig I.1 Schéma d'un système photovoltaïque.....	4
Fig I.2 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable.....	5
Fig I.3 Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur.....	6
Fig I.4 Schéma d'un système hydroélectrique.....	7
Fig I.5 Schéma d'une pile à combustible.....	8
Fig I.6 Représentation schématique d'une chaîne de conversion d'énergie électrique connectée à un convertisseur unidirectionnel.....	10
Fig I.7 Représentation schématique d'une chaîne de conversion d'énergie électrique reliée à un STATCOM.....	11
Fig I.8 Machines multiphasées avec le nombre de phases statoriques multiple de trois.....	12
Fig I.9 Machines multiphasées avec le nombre de phases statoriques n'est pas un multiple de trois.....	12
Fig I.10 Solutions pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie.....	14
Fig I.11 Schéma de contrôle direct du flux statorique de l'enroulement de commande.....	15
Fig II.1 Représentation des enroulements de la MASDE.....	17
Fig II.2 Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q).....	23
Fig II.3 Schéma de l'onduleur triphasé.....	29
Fig II.4 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	30
Fig II.5 Evolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 3]$ et $[4, 5]$ s.....	32
Fig. III.1. Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.....	35
Fig III.2 Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC).....	37
Fig III.3 Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI.....	40
Fig III.4 Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques.....	41
Fig. III.5. Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE.....	41

FigIII.6 Représentation schématique du bloc de découplage FOC.....	42
FigIII.7 Schéma de défluxage.....	43
Fig. III.8. Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse.....	43
Fig.III.9. Boucle de régulation de vitesse.....	44
Fig. III. 10 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s.....	48
Fig. III.11 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 10.5$ et -10.5 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s.....	51
Fig. III.12 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s.....	55

Liste des symboles

L.

L_m Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (H)

L_{mr} La valeur maximale des coefficients d'inductances (H)
Mutuelles rotoriques

L_{ms} La valeur maximale des coefficients d'inductances (H)
mutuelles statoriques

L_r La valeur maximale des coefficients d'inductances (H)
de fuite du rotor

L_{s1}, L_{s2} Les valeurs maximales des coefficients d'inductances (H)
de fuite de l'étoile 1, étoile 2

M.

m Indice de modulation

N.

N_r Vitesse asynchrone (tr/min)

N_s Vitesse synchrone (tr/min)

P.

P Nombre de pair de pôles du bobinage

P_a Puissance absorbée par la MASDE (W)

P_e Puissance active fournie au stator (W)

P_f Pertes dans le fer (W)

P_{jr} Pertes joule rotoriques (W)

P_{js} Pertes joule statoriques (W)

P_m Puissance mécanique (W)

P_{mc} Puissance mécanique fournie à la charge (W)

P_r Puissance active fournie au rotor (W)

F_v	Pertes par frottement et aération	(W)
$[P(\mathcal{E}_r)]$	Matrice de transformation d'enroulement rotorique	
$[P(\mathcal{E}_{s1s2})]$	Matrice de transformation du premier, deuxième enroulement statorique (étoile 1, étoile 2) respectivement	
p	Opérateur de Laplace	
P(x)	Un prédicat	
Q.		
q	Nombre de phases statoriques	
q_a	Nombre équivalents de phases	
R.		
r	Coefficient de réglage en tension	(N.m)
R_{s1}	Résistance d'une phase de l'étoile 1	(Ω)
R_{s2}	Résistance d'une phase de l'étoile 2	(Ω)
R_r	Résistance d'une phase rotorique	(Ω)
r_{s1}, r_{s2}, r_r	Matrices de résistances statotiques et rotoriques	(Ω)
V.		
V_{abcr}	Tensions triphasées rotoriques	(V)
$V_{abc:s12}$	Tensions triphasées statoriques (étoiles 1 et 2)	(V)
$V_{d:s1q:s1}$	Tensions de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q)	(V)
$V_{d:s2q:s2}$	Tensions de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q)	(V)
V_{pm}	Valeur crête de l'onde de modulation	
$v_{s1} v_{s2}$	Vecteur de tensions de l'étoile 1 et 2	(V)
W.		
W	Energie électromagnétique	(Joule)
w_{gl}	Pulsation électrique du glissement	(rd/s)

ω_r	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques	(rd/s)
ω_s	Pulsation électrique des grandeurs statoriques	(rd/s)
α.		
α	Angle électrique de décalage entre les deux étoiles	(rd)
φ.		
φ_{abc_r}	Flux triphasés rotoriques	(Wb)
φ_{abc_s1s2}	Flux triphasés statoriques (étoile 1 et 2)	(Wb)
φ_{drqr}	Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d,q)	(Wb)
$\varphi_{d_s1q_s1}$	Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q)	(Wb)
$\varphi_{d_s2q_s2}$	Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q)	(Wb)
$[\varphi_{s1}][\varphi_{s2}][\varphi_r]$	Vecteur de flux de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor	(Wb)
Ω.		
Ω_m	Vitesse mécanique de rotation du rotor nominale	(rd/s)
Ω_r	Vitesse angulaire de rotation du rotor	(rd/s)
Ω_s	Vitesse angulaire de rotation du champ statorique	(rd/s)
θ.		
θ_{geo}	Angle géométrique de rotation du rotor	(rd)
θ_r	Angle entre l'étoile (1) et le rotor	(rd)

Notations

FOC	Field Oriented Control (Commande à flux orienté)
GAS	Génératrice Asynchrone à cage
GASDE	Génératrice Asynchrone Double Etoile
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
MCC	Machine à Courant Continue
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel-Intégral
STATCOM	Static Var Compensator

Introduction générale

Les trois machines à courant continu, synchrone et asynchrone ont de tout temps servi les besoins de l'industrie traditionnellement, ces machines électriques ont été commandées manuellement et les équipements pour ces opérations sont complexes et coûteux.

La première machine asynchrone triphasée fut réalisée par l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski en 1889 [1]. Depuis les moteurs asynchrones sont de plus en plus utilisés dans le monde industriel pour les différentes applications modernes telles que la robotique et le véhicule. Ils sont aussi à l'étude pour remplacer les actionneurs hydrauliques et pneumatiques dans différentes applications telles que l'aérospatial, les portes de métro, etc. Cela est dû à plusieurs facteurs : coût de fabrication faible, robustesse et fiabilité. Contrairement aux deux moteurs cités plus hauts, les enroulements du moteur asynchrone sont court-circuités, donc ne nécessite pas d'alimentation externe.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la machine asynchrone double étoile. En effet ces machines possèdent de nombreux avantages : la segmentation de la puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, grande fiabilité.

Dans le premier chapitre, des généralités sur les systèmes de conversion électromécanique permettent un aperçu sur leurs diversités et leurs principes de fonctionnement, ainsi que les différentes technologies et machines électriques qui permettent la conversion électromécanique. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production d'électricité dans le monde. Plusieurs architectures existantes sont présentées. Elles se distinguent principalement par les machines électriques utilisées et les convertisseurs d'électronique de puissance associés. Cette partie décrit également les avantages et les inconvénients des machines polyphasées ou multi-étoiles.

Le deuxième chapitre sera dédié à la description ainsi qu'à la modélisation de la machine asynchrone double étoiles, ces différentes caractéristiques et son principe de fonctionnement seront aussi présentés.

Le dernier chapitre fera l'objet de l'étude d'un système de conversion à base de la MASDE, une analyse des performances de ce système et son contrôle seront proposées.

Chapitre I:

*Généralités sur les différentes
chaines de conversion
d'énergie électrique utilisée
dans les systèmes autonomes*

I.1 Introduction

Une grande partie des utilisateurs de l'énergie électrique sont raccordés au réseau public. Pourtant, un des domaines où les technologies renouvelables peuvent se développer de façon substantielle est celui de l'électrification rurale ou des sites isolés. Quand les méthodes conventionnelles de fourniture d'énergie électrique comme l'extension du réseau et l'utilisation de générateurs diesel deviennent trop coûteuses ou difficiles à implémenter, les technologies renouvelables, capables de générer de l'électricité sur place, sont une possibilité très intéressante, tant au niveau technique qu'économique.

Dans ce chapitre nous présenterons les différents systèmes de conversion électromécanique à savoir leur diversité, leur principe de fonctionnement, ainsi que les différentes technologies et machines électriques utilisées. Nous aborderons aussi plusieurs architectures existantes qui se distinguent principalement par les machines électriques utilisées et les convertisseurs d'électronique de puissance associés. A la fin nous décrirons les avantages et les inconvénients des machines multi-étoiles ou polyphasées.

I.2 Histoire des machines électriques

En 1821 l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique, et en 1822 Peter Barlow lui adjoint une roue dentée. En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. En parallèle, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène. L'année suivante Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Pixii, ont réalisé la génératrice à courant continu. En 1834 Thomas Davenport a inventé le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé puis breveté en 1837[2].

En 1888 Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a eu un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique. En 1889 l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski a réalisé la première machine asynchrone triphasée cette dernière domine assez largement le domaine des machines électriques, grâce à plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types. Elle est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, la moins exigeante en termes d'entretien, présente un taux de défaillance très peu élevé, fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances, etc. [3].

Depuis la fin de l'année 1920, les machines à deux enroulements triphasés au

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique utilisée dans les systèmes autonomes

stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance [4].

I.3 Description des systèmes autonomes

Système isolé ou autonome est l'appellation commune pour décrire des systèmes de production d'électricité alimentant des installations électriques n'étant pas raccordées au réseau de distribution, soit par l'inexistence de celui-ci, soit par contrainte technique ou financière, soit par volonté de l'utilisateur dans une démarche personnelle.

Contrairement aux installations raccordées au réseau de distribution qui bénéficient d'une puissance quasi illimitée car alimentés par des générateurs de forte puissance (barrage hydro-électrique, centrale nucléaire, centrale au fuel ou au charbon, etc.) avec les pertes du réseau qu'on peut imaginer, la philosophie propre aux systèmes autonomes est de satisfaire seulement et localement aux besoins d'un utilisateur, après avoir défini son profil de consommation.

Que ce soit dans les pays les plus reculés ou défavorisés, où le développement et la stabilité des réseaux sont une réelle problématique, que ce soit dans les pays industrialisés, ou que ce soit purement et simplement par conviction environnementale, les systèmes autonomes via l'utilisation des énergies renouvelables que sont le soleil, l'eau et le vent, permettent aujourd'hui avec l'évolution des technologies, de répondre à bon nombre de contraintes liées à l'autonomie énergétique.

I.4 Quelques types des systèmes autonomes

I.4.1 Système photovoltaïque

L'électricité photovoltaïque est une technologie remarquable qui transforme l'énergie solaire (rayonnement lumineux) en énergie électrique.

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué d'un générateur, généralement associé

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique utilisée dans les systèmes autonomes

à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La figure I.1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général [5].

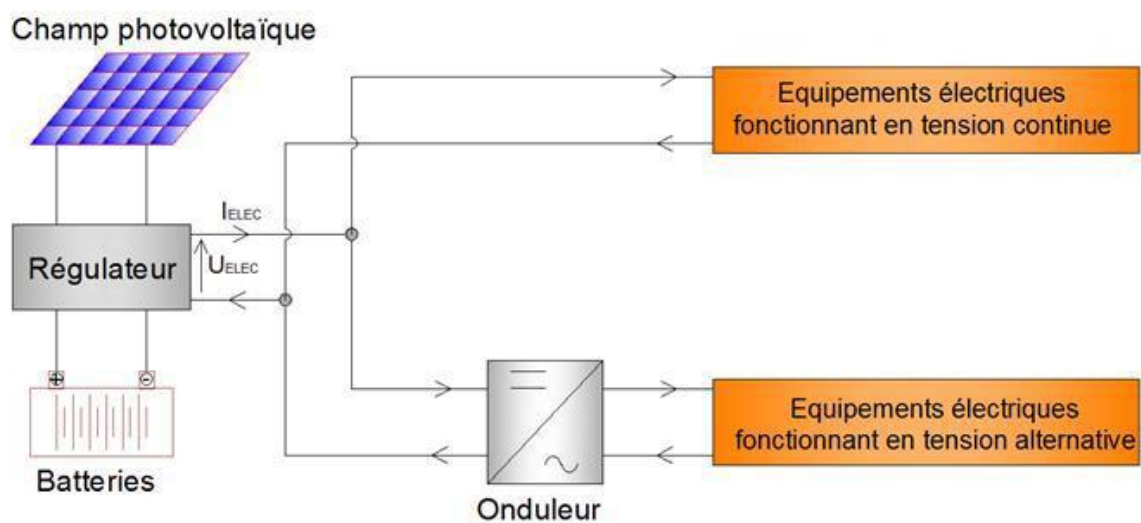


Fig I.1 Schéma d'un système photovoltaïque

I.4.2 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité, la plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur.

Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes [6]. Les groupes électrogènes sont utilisés en tant que sources d'énergie électrique

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique utilisée dans les systèmes autonomes

autonomes :

- dans des zones non couplées à un réseau d'énergie. La souplesse de l'installation du groupe électrogène, sa modularité et son coût en font le moyen de production d'électricité idéal.
- pour les systèmes de secours nécessitant une haute qualité de fourniture d'énergie (évacuation de personnes, hôpitaux, etc.). Il présente des avantages liés à un large éventail de puissance, la rapidité de sa mise en œuvre et sa capacité à fonctionner pendant de longues périodes;
- comme fourniture d'énergie auxiliaire pour limiter la puissance de pointe absorbée sur le réseau d'énergie.

Les groupes électrogènes peuvent fonctionner à vitesse fixe comme à vitesse variable, on distingue deux avantages de la vitesse variable [7] :

- pour un même moteur diesel, on augmente la puissance fournie si on fait varier la vitesse d'entraînement;
- l'amélioration du rendement de moteur diesel, toutes les études qui ont été déjà menées sur les groupes électrogènes à vitesse variable ont montré que la consommation de diesel est optimisée et réduite par rapport au groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe.

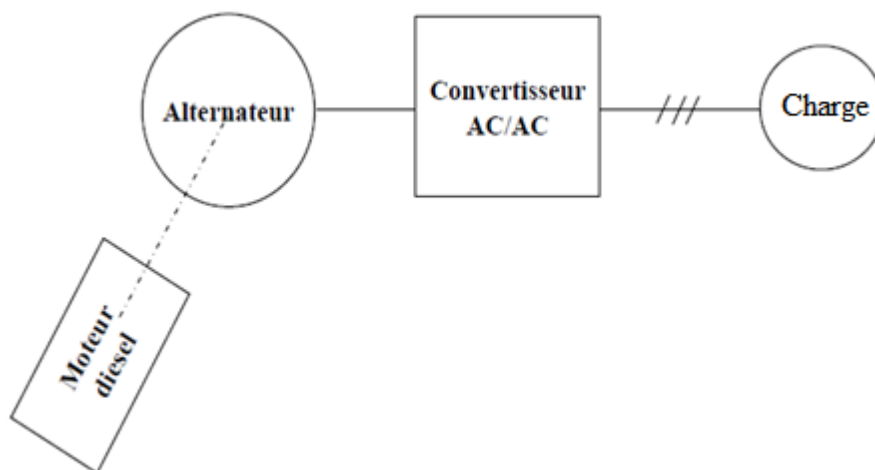


Fig I.2 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable

I.4.3 Générateur éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [8].

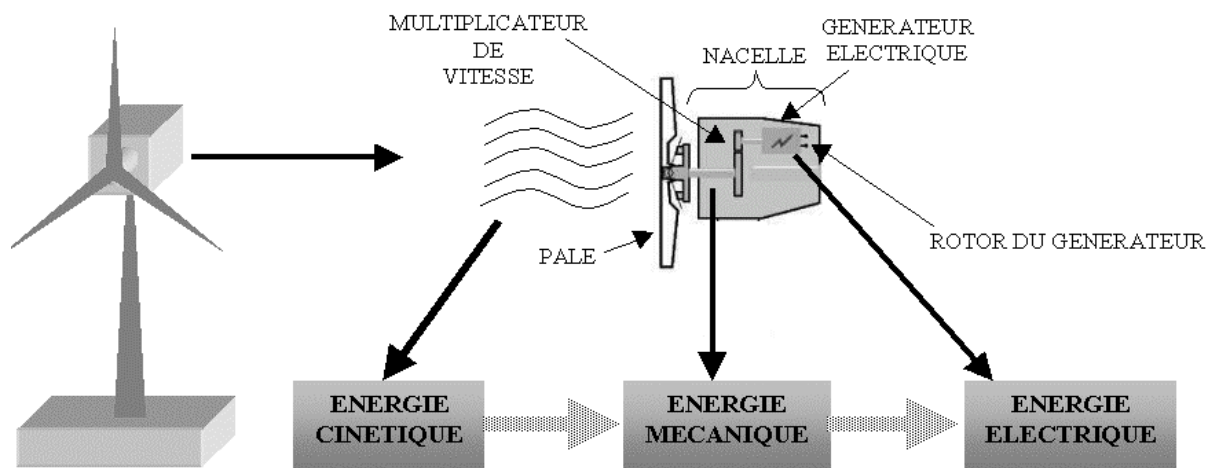


Fig I.3 Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

I.4.4 Système hydraulique

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2016) [9] derrière le charbon (40,6%) et le gaz (22,2%). En France, la production hydroélectrique atteint 63,8 TWh en 2012) [10], soit 11,8% de la production totale d'électricité du pays, et en Algérie l'année 2014 la production en hydroélectricité a atteint 0.4% de la production totale d'électricité du pays [11].

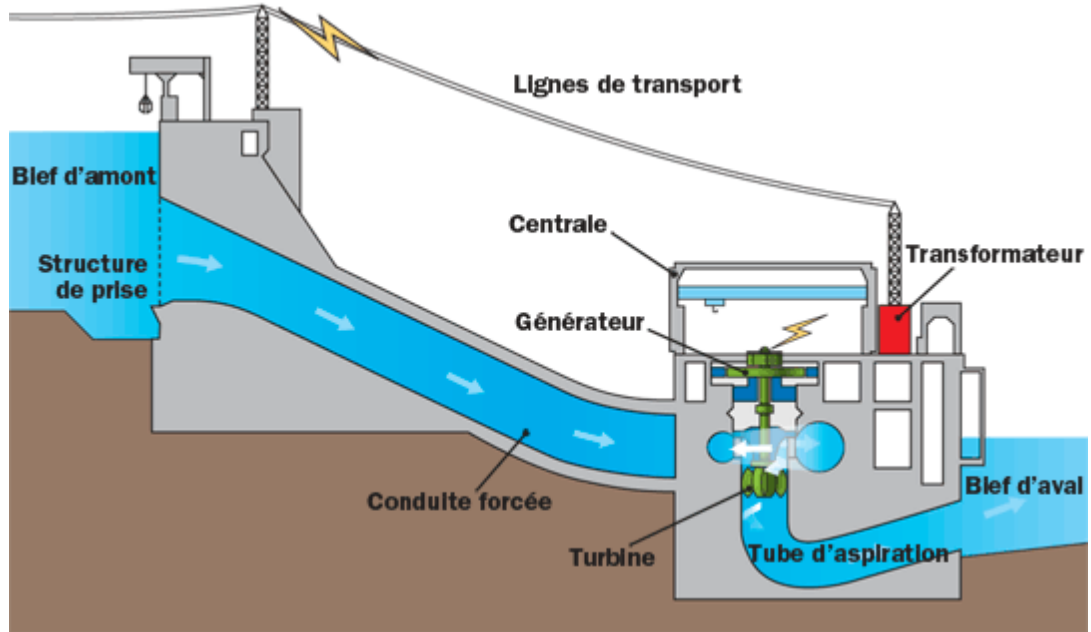


Fig I.4 Schéma d'un système hydroélectrique

I.4.5 Pile à combustible PAC

La pile à combustible est un générateurs d'électricité qui transforme l'énergie d'une réaction chimique en courant électrique de façon continue.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.

L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile [12].

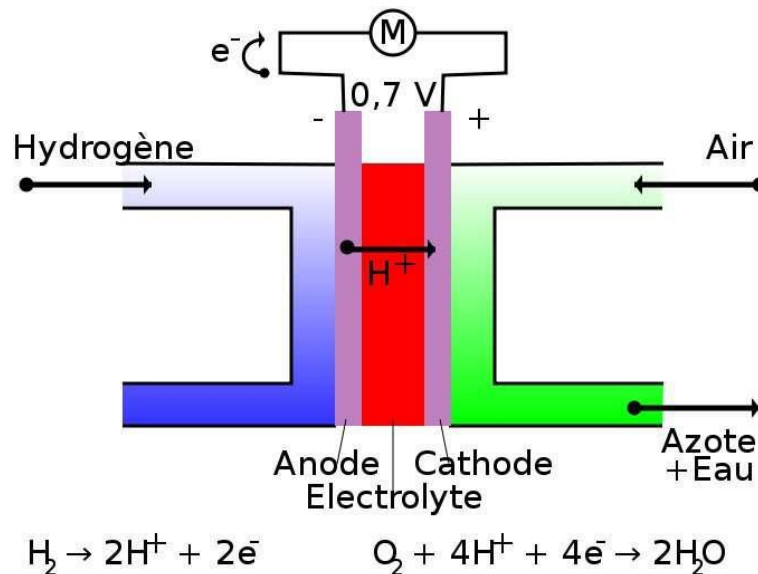


Fig I.5 Schéma d'une pile à combustible

I.5 Machines électriques utilisées pour la conversion électromécanique

I.5.1 Cas des systèmes connectés aux réseaux

On peut recenser deux types de systèmes raccordés sur les réseaux électriques :

I.5.1.1 Systèmes de production à vitesse fixe

Ces systèmes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone avec des régulateurs pour la production hydroélectrique, centrales thermique, et nucléaire [13], ou d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques pour une application éolienne dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control) [14].

I.5.1.2 Systèmes de production à vitesse variable.

Ces systèmes reposent sur l'utilisation de plusieurs types de machines électriques :

I.5.1.2.1 Machine asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné permet d'exploiter des convertisseurs d'électronique de puissance dimensionnés pour des puissances réduites. Son inconvénient est lié à la maintenance exigée par ses contacts glissants (balais-bagues).

A. Variation de la résistance rotorique

A l'aide de résistances disposées en série avec les enroulements rotoriques, une interface d'électronique de puissance (redresseur à diode et un hacheur à transistor permet la variation du glissement et donc une variation de la vitesse d'environ 10 % (diminution), [15] [16].

B. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la machine asynchrone doublement alimentée (MADA). En tant que génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, la machine asynchrone à bagues présente l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse. Des dispositifs primitifs, comme les plots résistifs et le hacheur rotorique, ont été introduits afin d'assurer le fonctionnement à vitesse variable de cette machine. Toutefois, ces dispositifs ne présentent qu'une plage de variation de vitesse limitée et un rendement global réduit. Plus tard, le montage en cascade hypo synchrone de la machine à bagues vient améliorer le problème de rendement. Enfin, suite à une large évolution des composantes de l'électronique de puissance et de la commande numérique, deux structures sont émergées pour l'alimentation de cette machine pour varier sa vitesse : la première consiste à coupler le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur de tension; dans la seconde, les deux armatures sont couplées à deux onduleurs de tension. C'est la double alimentation de la machine, structure présentant une bonne flexibilité et un nombre suffisant de paramètres de réglage [17].

I.5.1.2.2 Machine synchrone

Les machines synchrones (à rotor bobiné ou à aimants permanents) sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement.

Dans une machine synchrone bobinée, le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI [18].

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. Les machines de ce type permettent de développer des couples mécaniques considérables.

I.5.2 Cas des systèmes en fonctionnement isolé et autonome

La conception des systèmes autonomes est considérablement différente de celle des systèmes connectés aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance extraite mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications des systèmes isolés et autonomes vu ses avantages : un bon rendement, 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 et machines synchrones à rotor bobiné.

Quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes et des spécificités autres que celles rencontrées dans le cas des systèmes couplés au réseau. En effet, la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes quelques que soient la vitesse de rotation et la puissance demandée [14].

Le système présenté dans la figure I.6 est composé d'une éolienne, un multiplicateur, une GAS, des condensateurs, redresseur à diode, un filtre, et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Pour maintenir la tension à une valeur constante à la sortie du hacheur, on agit sur le rapport cyclique de ce dernier [19].

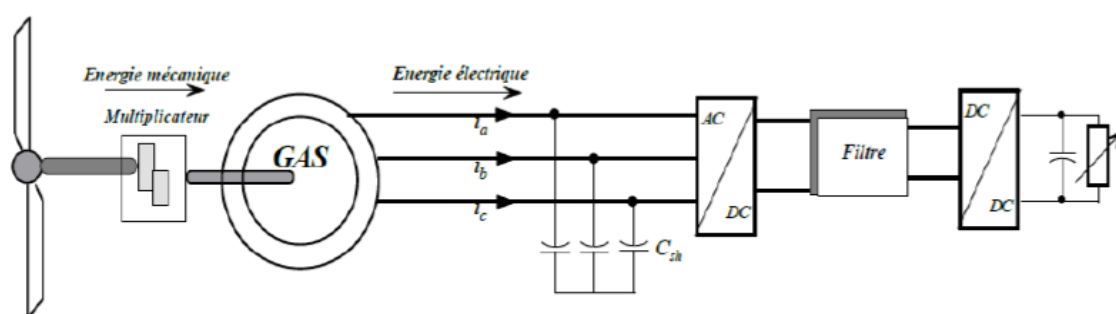


Fig I.6 Représentation schématique d'une chaîne de conversion d'énergie électrique connectée à un convertisseur unidirectionnel

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique utilisée dans les systèmes autonomes

L'association du système à un compensateur synchrone statique «STATCOM» constitue aussi une solution. Le compensateur synchrone statique « STATCOM »est un onduleur de tension avec une batterie de stockage reliée sur son bus continu et un transformateur abaisseur du côté alternatif figure I.7.

Le STATCOM fournit ou absorbe de la puissance réactive en contrôlant l'amplitude de la tension. Si la puissance active demandée est supérieure à l'offre, le STATCOM en fournit au réseau. Dans le cas contraire, il en absorbe. Mais l'intervention du STATCOM est limitée par les puissances maximales de celui-ci et le coût élevé.

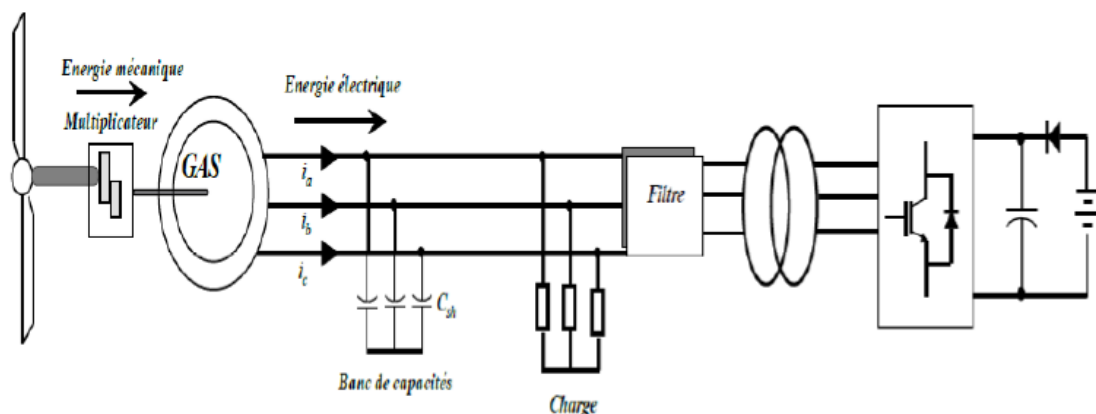


Fig I.7 Représentation schématique d'une chaîne de conversion reliée à un STATCOM

I.5.3 Machines multiphasées

Les machines triphasées à courant alternatif dominant assez largement le domaine des machines électriques, mais depuis longtemps déjà, on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [8].

Une machine multiphasée est composée de n bobinages déphasés spatialement de $2\pi/n$ alimentés par des tensions déphasées temporellement de $2\pi/n$, avec n est le nombre de phases. Ces machines sont caractérisées par un couplage magnétique entre les phases. On distingue deux types de machines multiphasées selon que le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois [8].

- Le premier type comporte les machines dont le nombre de phases statoriques "q" est un multiple entier de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en

plusieurs étoiles. On appelle aussi ce genre de machines « machines multi étoiles » [8].

- Le second type est constitué des machines possédant un nombre de phases statoriques qui contrairement au type précédant n'est pas un multiple de trois [8].

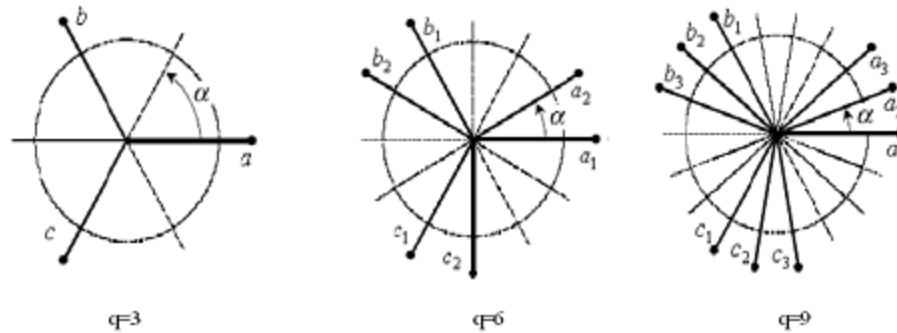


Fig I.8 Machines multiphasées avec le nombre de phases statoriques multiple de trois

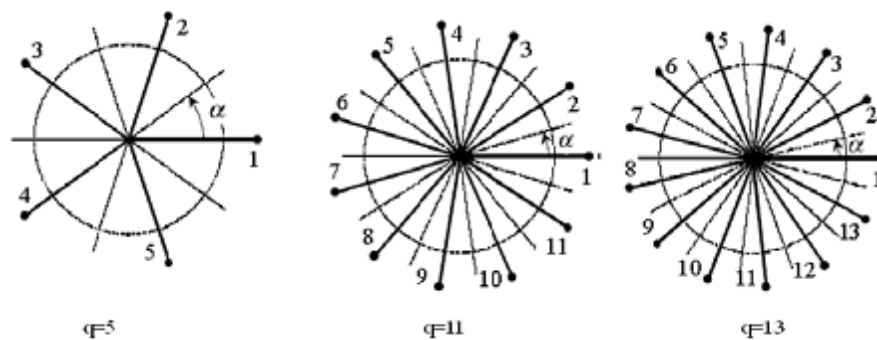


Fig I.9 Machines multiphasées avec le nombre de phases statoriques n'est pas un multiple de trois

I-6 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone double étoile

I.6.1 Avantages

A. Segmentation de la puissance

A puissance donnée, lorsqu'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase. La puissance totale est donc répartie sur un nombre plus important de phases, la puissance demandée par chacune d'elles est alors réduite. Ainsi, l'alimentation de la machine par onduleur peut se faire avec des composants de puissance de calibre inférieur, pouvant fonctionner à des fréquences de

Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique utilisée dans les systèmes autonomes

commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations de courants et de couple [4].

B. Amélioration de la fiabilité

La fiabilité de la machine polyphasée est plus élevée que celle de la machine triphasée, car l'augmentation de nombre de phases va donner pour le système une fonction risque très petite que celle de la machine triphasée. Même si un des enroulements ou un des deux onduleurs soit hors d'usage pour une raison quelconque, le moteur a la possibilité de continuer à tourner avec l'autre enroulement. Cette caractéristique revêt un grand intérêt dans certaines applications (traction navale, traction ferroviaire, etc.) [20].

C. Elimination des harmoniques d'espace

On peut éliminer les harmoniques responsables d'un creux de la vitesse synchrone, dans la caractéristique couple/vitesse de certaines machines triphasées. Plus la valeur de nombre équivalent de phase est grande, plus les rangs des premiers harmoniques d'espace existants sont élevés, on remarque aussi que à nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôles et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental. A courant donné, on augmente donc l'amplitude du fondamental de la f. m. m, comparée au cas de la machine triphasée [4].

D. Réduction des ondulations de couple et des pertes rotoriques

Dans une machine double étoile, les harmoniques ne créent pas de f.m.m, quelque harmonique de couple de rang est donc éliminé. Cette propriété des machines multiphasées à éliminer les harmoniques de couple de rang faible est aussi un avantage certain. On remarque aussi que, puisque certaines harmoniques de courants statoriques ne créent pas de f. m. m, alors les courants peuvent être induits au rotor. Par conséquent, une machine multiphasée aura pratiquement toujours moins de pertes rotoriques qu'une machine triphasée [4].

I.6.2 Inconvénients

La MASDE présente des inconvénients tels que, [21].

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine.

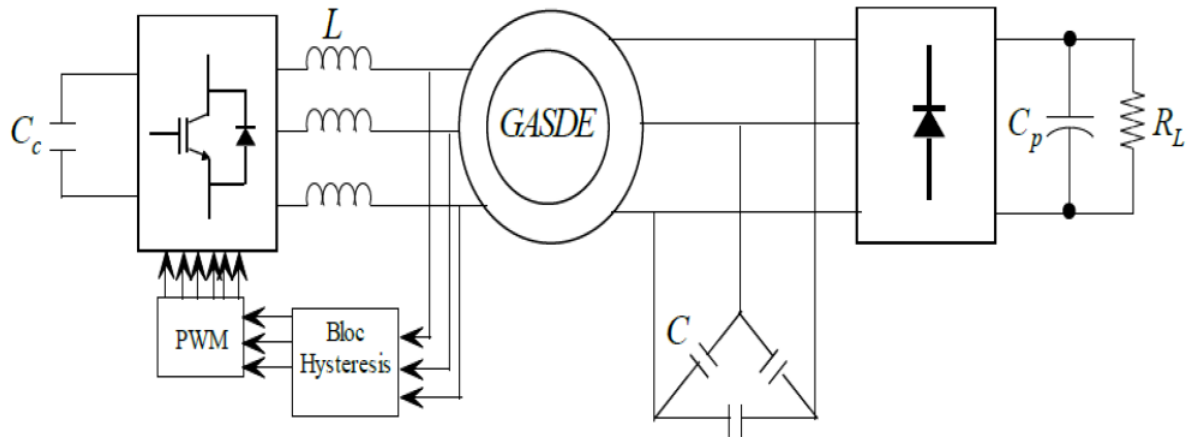


Fig I.11 Schéma de contrôle direct du flux statorique de l'enroulement de commande

I.8 Conclusion

Au cours de cette étude bibliographique, nous avons balayé un grand nombre de travaux effectués sur la machine asynchrone double étoile. La richesse et la variété des sujets traités justifient l'intérêt croissant pour cette machine dans divers champs d'applications.

La majorité des applications industrielles faisant appel à ce type de machine (MASDE), est justifié par :

L'absence d'harmoniques d'espace, la segmentation de puissance, une bonne fiabilité et la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

Chapitre II :

Modélisation de la machine
asynchrone double étoile

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double étoile (MASDE) a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié.

Après la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques, cette dernière basée sur la transformation de PARK qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement. Nous étudierons l'alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande M.L.I. L'étude sera menée avec un décalage angulaire $\alpha = 30$. Enfin, des résultats de simulations seront présentés et commentés.

II.2 Description de la machine asynchrone double étoile

La MASDE se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique $\alpha=30^\circ$, et d'un rotor à cage d'écureuil.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse Ω différente de Ω_s , la cage rotorique devient le siège d'un système de forces électromotrices, engendrant elles-mêmes des courants induits rotoriques qui se manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées respectivement par les indices 1 et 2 [4].

II.3 Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique est non saturé ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armateurs sont à répartition sinusoïdale, la f.m.m est variable, les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulement sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;

- La machine est de constitution symétrique.

II.4 Modèle de la MASDE

II.4.1 Représentation de la machine

La représentation schématique des enroulements de la MASDE par la figure II.1.

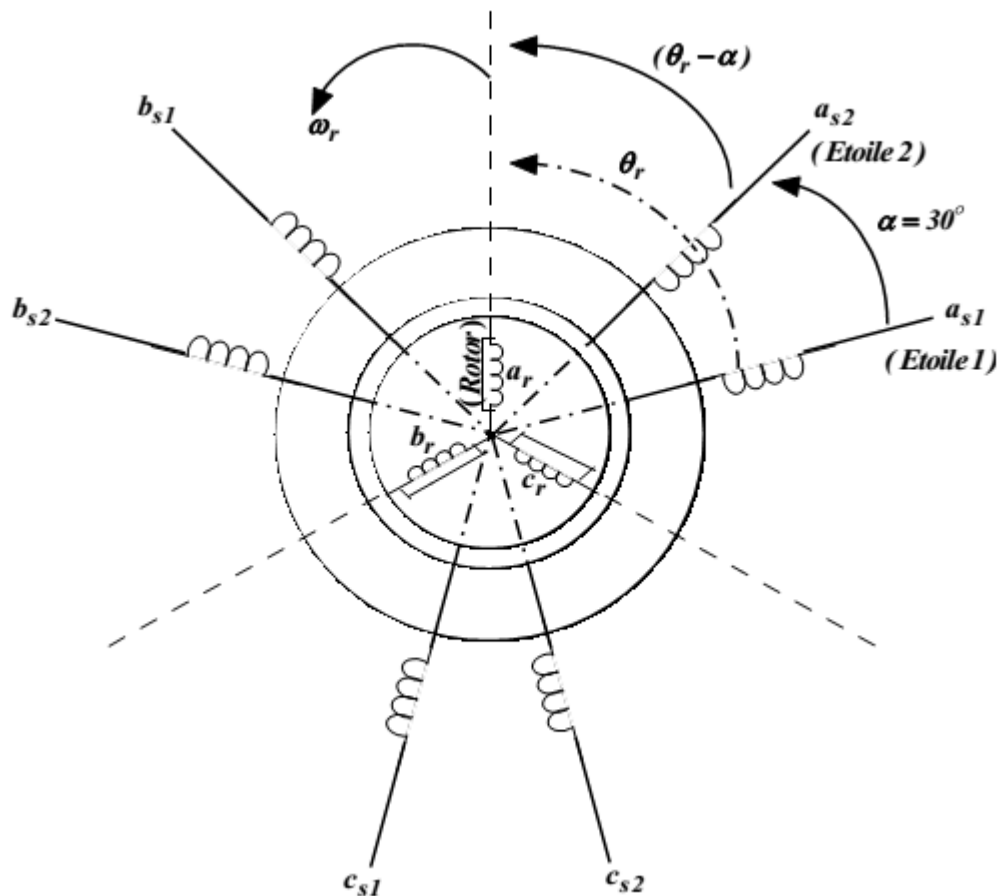


Fig II.1 Représentation des enroulements de la MASDE

Avec :

a_r, a_{s1}, a_{s2} : Phases (1) du rotor, étoile (1), étoile (2), respectivement ;

b_r, b_{s1}, b_{s2} : Phases (2) du rotor, étoile (1), étoile (2), respectivement ;

c_r, c_{s1}, c_{s2} : Phases (3) du rotor, étoile (1), étoile (2), respectivement ;

α : Angle électrique de décalage entre les deux étoiles

θ_r : Angle entre l'étoile (1) et le rotor.

II.4.2 Equations électriques

Les équations des tensions de la machine asynchrone double étoile représentent pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et de la chute inductive due au flux.

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} v_{as1} = R_{s1} i_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = R_{s1} i_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = R_{s1} i_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} v_{as2} = R_{s2} i_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = R_{s2} i_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = R_{s2} i_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} = 0 \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} = 0 \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } [v_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] ;$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } [v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] ; ;$$

$$\text{Pour le rotor : } [0] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r].$$

Avec :

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

$[v_{s1}]$: Vecteur de tension de l'étoile 1 ;

$[v_{s2}]$: Vecteur de tension de l'étoile 2 ;

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

$[i_{s1}]$: Vecteur de courant de l'étoile 1 ;

$[i_{s2}]$: Vecteur de courant de l'étoile 2 ;

$[i_r]$: Vecteur de courant du rotor

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{bmatrix}; [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{bmatrix};$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

R_{s1} : Résistance d'une phase de l'étoile 1 ;

R_{s2} : Résistance d'une phase de l'étoile 2 ;

R_r : Résistance d'une phase du rotor ;

$[R_{s1}], [R_{s2}], [R_r]$: Matrice des résistances statoriques et rotoriques.

Où :

$$R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{s1}; R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{s2}; R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

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

$[\varphi_{s1}]$: Vecteur de flux de l'étoile 1 ;

$[\varphi_{s2}]$: Vecteur de flux de l'étoile 2 ;

$[\varphi_r]$: Vecteur de flux du rotor ;

II.4.3 Equations magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

Les sous matrices $[L_{s2,s1}] = [L_{s2,s1}]^t$, $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$, $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$.

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

- L_{s1} : Inductance propre de la 1^{ère} étoile
- L_{s2} : Inductance propre de la 2^{ème} étoile

- L_{ms} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles statoriques ;
- L_{mr} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles rotoriques ;
- L_{sr} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor ;
- L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor.

II.4.4 Expression du couple électromagnétique

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

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial W}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$W = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.6})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = p ([i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t) \quad (\text{II.7})$$

II.4.5 Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.8})$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad (\text{II.9})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.10})$$

J : Inertie totale des parties tournante et K_f : Coefficient de frottement.

II.5 Modèle biphasé de la MASDE

II.5.1 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, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[P(\theta)]$.

On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant. La matrice de Park pour l'étoile 1 est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La matrice de Park pour le rotor est définie comme montré par l'équation (II.13)

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

I.5.2 Modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q)

La figure II.2 représente le modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q) tournant à la vitesse ω_s .

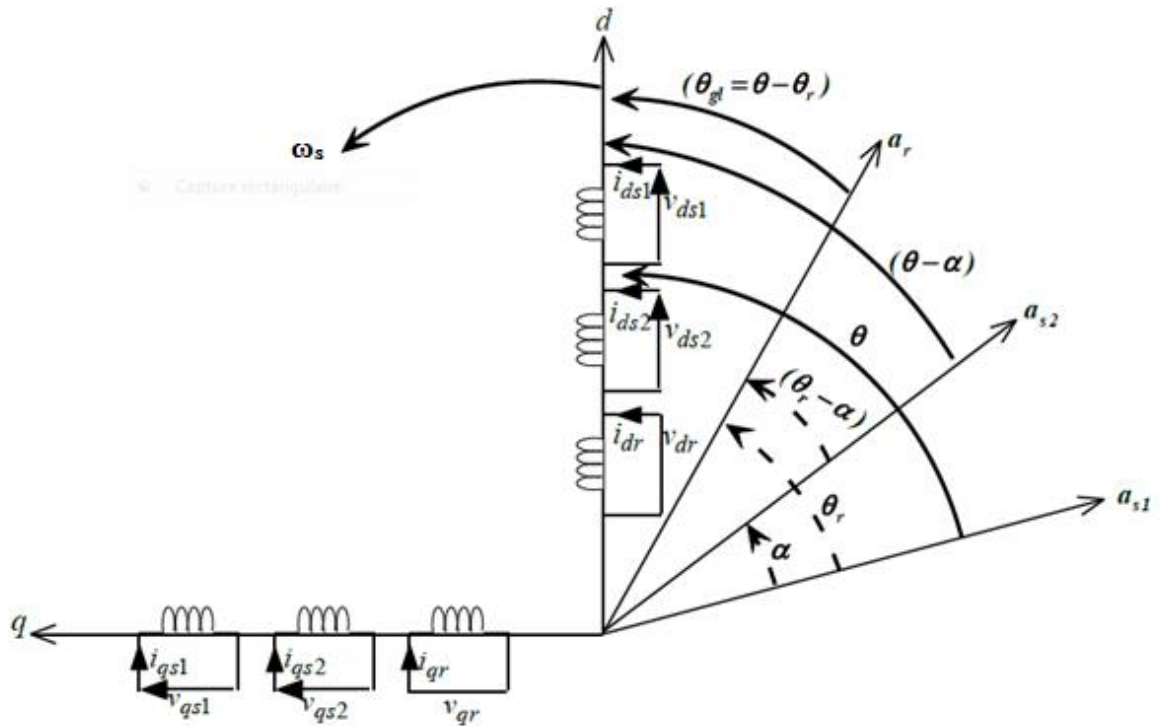


Fig II.2 Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q)

II.5.2.1 Choix du référentiel

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème à étudier, et des objectifs à atteindre.

II.5.2.1.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ ou } \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

D'où

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega_{\text{mec}}$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires avec une variation importante de la vitesse de rotation.

II.5.2.1.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega_{\text{mec}}$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée constante

II.5.2.1.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans celui-ci, on a :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s - p\Omega_{\text{mec}}$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques [23].

II.5.3 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes (d, q)

L'écriture du modèle de la MASDE dans un repère biphasé lié au champ tournant est obtenue en utilisant les transformations de Park permettant la conservation de la puissance. En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques, nous obtenons le modèle électrique classique suivant [24]:

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1}\varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs1} + \omega_s\varphi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs2} + \omega_s\varphi_{ds2} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} + \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Où : $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$

Les composantes de flux statoriques et rotoriques s'expriment comme suite :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

En introduisant le système d'équations (II.15) dans (II.14) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][i] + \omega_{gl}[C][I] + [D][I] \quad (\text{II.16})$$

Où:

$[U] = [v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}, v_{qs2}, v_{dr}, v_{qr}]^t$: Vecteur de commande :

$[I] = [i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}]^t$: Vecteur d'état, et $[i] = \frac{d}{dt}[I]$;

$[B] = \text{diag}[111100]$;

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \end{bmatrix}$$

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

$$[D] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_s(L_{s1} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m & L_m & -\omega_s L_m \\ \omega_s(L_{s1} + L_m) & R_{s1} & \omega_s L_m & L_m & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & R_{s2} & -\omega_s(L_{s2} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s(L_{s2} + L_m) & R_{s2} & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.16) sous forme d'état, on trouve :

$$[I] = [L]^{-1}([B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I]) \quad (\text{II.17})$$

II.5.4 Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axes (d, q) , tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par :

$$P_a = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant les tensions $(v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}$ et $v_{qs2})$ par leurs expressions dans l'équation (II.18), on trouve :

$$P_a = [R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2] + \left(\frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right) + \omega_s(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (\text{II.19})$$

Cette expression se compose de trois termes : le premier correspond aux pertes par effet Joule, le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) et le dernier est la puissance électromagnétique (P_{em}).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.20})$$

L'expression du couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant les flux ($\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}$ et φ_{qs2}) donnée par (II.15) dans (II.21) on obtient :

$$C_{em} = pL_m[(i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}] \quad (\text{II.22})$$

A partir des équations des flux rotoriques (φ_{dr} et φ_{qr}) exprimées par (II.15), on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II.23})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant (II.23) et (II.24) dans l'équation (II.22), on aura la relation du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) suivante :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\varphi_{qr}] \quad (\text{II.25})$$

II.6 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI

II.6.1 Modélisation de l'onduleur de tension

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 [25]. 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. Ce dernier est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire

transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interupteur est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interupteur est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} f_i + \bar{f}_i = 1 \\ i = 1 \dots 3 \end{cases}$$

La figure II.3 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \quad (\text{II.26})$$

$$V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \quad (\text{II.27})$$

$$V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \quad (\text{II.28})$$

Les tensions simples v_{as}, v_{bs}, v_{cs} forment un système triphasé équilibré, tel que :

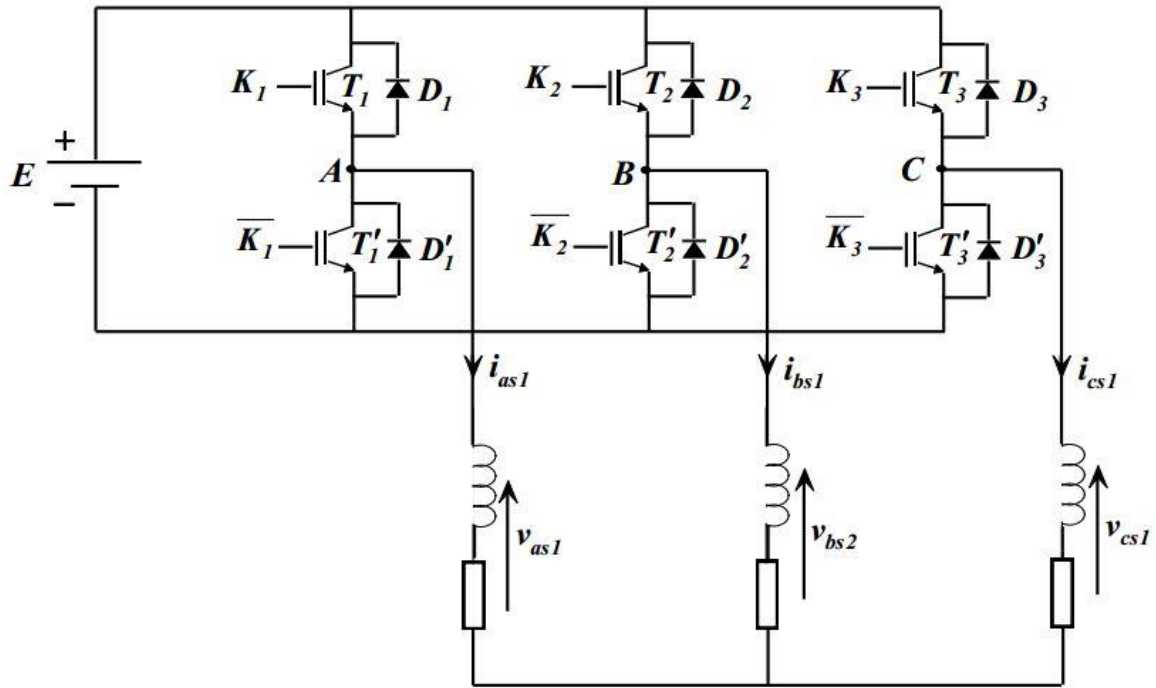
$$v_{as} + v_{bs} + v_{cs} = 0 \quad (\text{II.29})$$

La résolution des équations (II.26), (II.27) donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$



FigII.3 Schéma de l'onduleur triphasé

II.6.2 Stratégie de commande sinus-triangle

La commande MLI sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme en dents de scie. 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 [26].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations (II.32), $(2\pi ft)$ par $(2\pi ft - \alpha)$ et l'indice 1 par 2.

$$\begin{cases} v_{as1}^* = v_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{bs1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} [-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

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

Avec : $m = \frac{f_p}{f}$

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

Avec : $r = \frac{V_m}{V_{pm}}$

II.6.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La figure II.4 représente l'association de la MASDE-convertisseurs de tensions à commande MLI sinus-triangle.

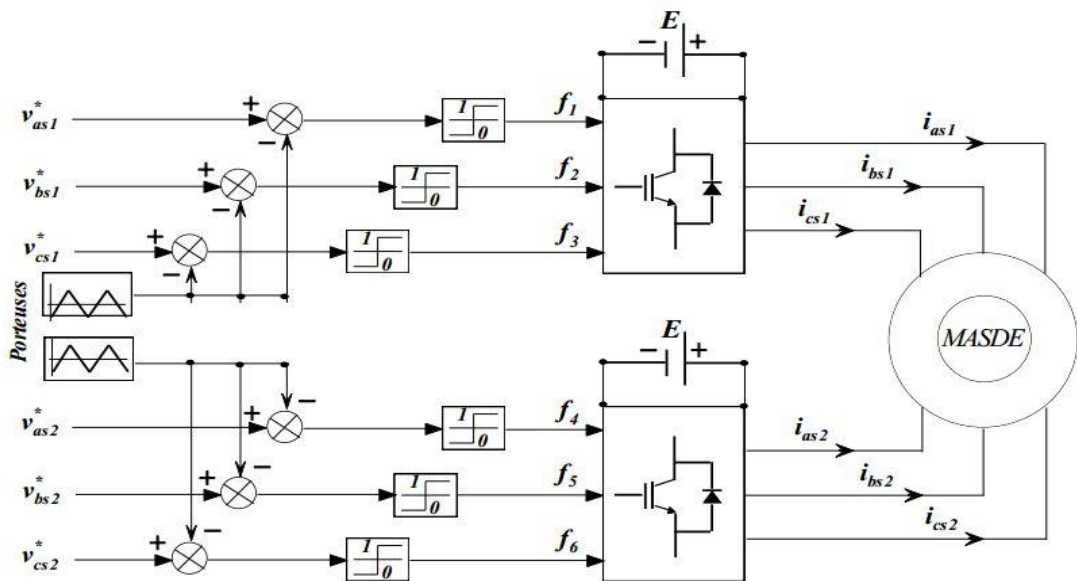


Fig. II.4 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

II.7 Simulation et interprétations des résultats

Pour la simulation, on a implanté le modèle électrique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink.

La figure II.5 représente la réponse de la MASDE alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$, suivi de l'application des charges nominales $C_r = 14N.m$ et $C_r = -14N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $[1.5, 3]s$ et $[4, 5]s$, cette dernière montre que : la vitesse de rotation de la MASDE augmente et évolue d'une manière presque linéaire au début du démarrage, puis elle se stabilise et prend la valeur de 2994tr/mn (très proche de celle du synchronisme). On remarque une légère diminution à $t=1.5s$ lors de l'introduction d'un couple résistant positif puis une légère augmentation à $t=4s$ lors de l'introduction d'un couple résistant négatif. On remarque des oscillations du couple électromagnétique pendant une durée de 0.5s qui correspondent aux instants de démarrage, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise. quand il atteint le régime permanent (compensation des pertes par frottement), à l'instant $t=1.5s$ et à $t=4s$, il prend des valeurs du couple résistant. Les courants statoriques présentent des dépassements excessifs au démarrage qui sont d'environ 5 fois le courant nominal, ensuite ils diminuent et se stabilisent au régime permanent, à $t=1.5s$ et à $t=4s$, ils augmentent légèrement sous l'effet du couple. L'évolution des flux rotorique selon (d, q) est presque identique à celle du couple électromagnétique. Comme on remarque aussi qu'à $t=1.5s$, la tension d'alimentation $v_{as1}(V)$ et le courant statorique $i_{as1}(A)$ sont de même signe donc, la machine absorbe de l'énergie active et réactive (nécessaire pour l'entraînement de la charge et pour sa magnétisation) de la source (réseau électrique). Par contre à $t=4.5s$, la tension statorique $v_{as1}(V)$ et le courant statorique $i_{as1}(A)$ sont de signe inverse alors, la machine fournit de la puissance active vers la source et absorbe de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation. On constate aussi que l'angle de déphasage électrique entre les deux étoiles est de ($\alpha=30^\circ$), cet angle est observé par les grandeurs (tension et courant) selon les axes réels. La technique utilisée engendre une augmentation des ondulations du couple dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs.

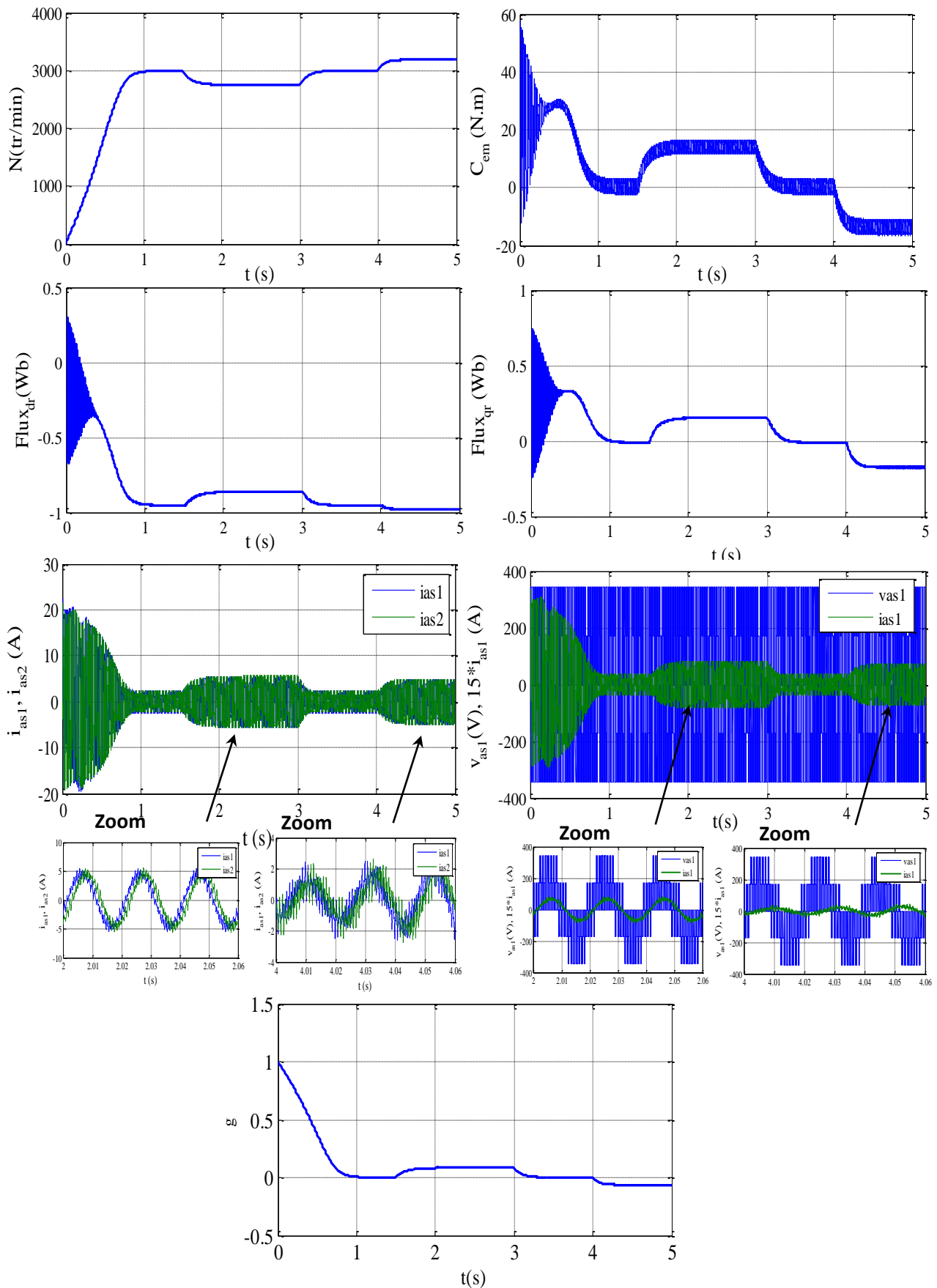


Fig II.5 Evolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 3]$ et $[4, 5]$ s

II.11 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la MASDE 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.

L'étude des caractéristiques de la MASDE alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI, en démarrage à vide puis en charge a été accomplie. Le processus de démarrage de la machine, suivi de l'application d'une charge a été simulé sous le logiciel Matlab/Simulink.

Lors du fonctionnement de la machine en charge, on a observé une diminution de la vitesse en fonctionnement moteur et une augmentation en fonctionnement génératrice, ce qui nécessite une régulation.

Dans le chapitre suivant, nous utiliserons une technique de commande vectorielle pour résoudre ce problème et nous étudierons le fonctionnement d'une chaîne de production à base de la machine asynchrone double étoile (MASDE).

Chapitre III :

Contrôle et analyse de la
chaîne de production à base de
la MASDE

III.1 Introduction

Le développement de nouvelles stratégies de commandes par des semi-conducteurs et de convertisseurs statiques ont permis une augmentation des fréquences de commutation et par conséquent une meilleure maîtrise de la conversion d'énergie.

Parallèlement, les moyens de calculs ont considérablement évolué. Tous ces progrès ont permis l'application de nouveaux algorithmes de commande assurant un découplage de flux et du couple dans les machines à courant alternatif en régimes transitoire et permanent.

L'algorithme de commande le plus populaire est la commande vectorielle à flux rotorique orienté (Flux Oriented Control), introduite par Kovacs en 1959 et reprise par Blascke en 1972, après une dizaine d'années. Elle a connu un développement important [27].

Les techniques de la commande vectorielle implantée par microprocesseurs ont permis l'utilisation de la machine asynchrone dans les applications de haute performance où le moteur à courant continu était le seul satisfaisant pour ce type d'application. Donc, l'idée de base de FOC est de rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

Aujourd'hui grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, de nombreux entraînements à courant continu sont remplacés par des variateurs à courant alternatif en particulier les machines asynchrones.

Dans cette partie, notre travail est différent des autres précédents, nous présenterons un cas où les étoiles des deux stators sont identiques, dans le deuxième et le troisième cas nous présenterons les étoiles des deux stators pas identiques et indépendantes l'une de l'autre en décrirons la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique sur la MASDE. Ensuite nous aborderons au premier lieu le principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle.

Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink seront présentés afin de montrer les performances de ce système.

III.2 Principe de la commande vectorielle

Le but de cette commande est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone à double étoile à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée en deux aspects figure III.1.

- Le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment l'un de l'autre ;

- Les conditions optimales de production du couple sont assurées en régime permanent et en régime transitoire.

En effet, dans une machine à courant continu le courant d'induit (I_a) contrôle le couple et le courant inducteur (I_f) contrôle le flux.

La relation du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = K \cdot \varphi_f \cdot I_a = K' \cdot I_f \cdot I_a \quad (III.1)$$

Avec :

φ_f : Flux imposé par le courant d'excitation I_f ;

K, K' : Constantes.

Pour la machine asynchrone à double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs du couple électromagnétique et du flux rotorique. Pour cela, il faut choisir une loi de commande et un système d'axes assurant le découplage du flux et du couple.

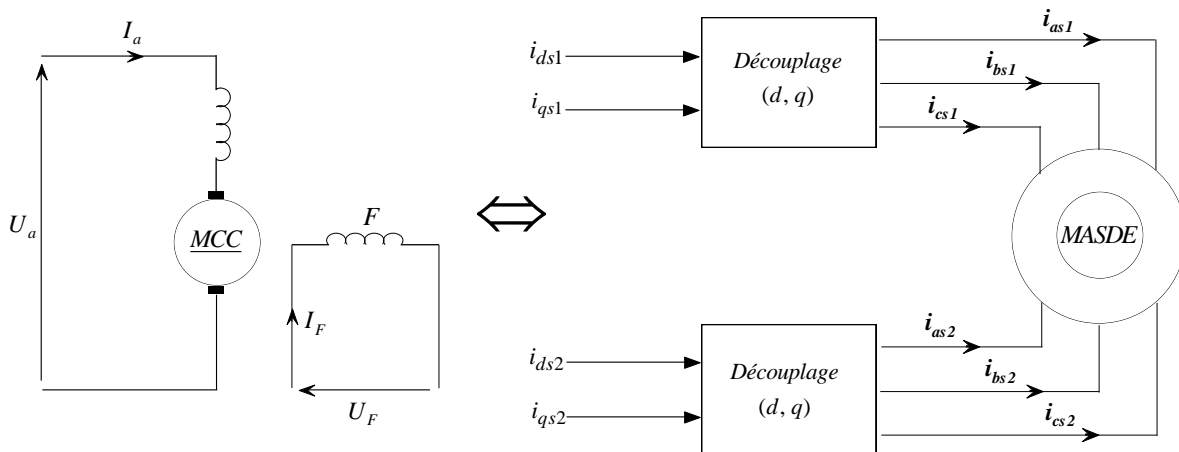


Fig. III.1. Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

III.3 Choix d'orientation du flux

La méthode de flux orienté est basée sur le choix du repère de référence, suivant la vitesse attribuée au repère (d, q) , de ce fait, les choix concernant l'alimentation et le repère ont été accomplis, dont l'alimentation en tension et le repère lié au champ tournant. Alors l'étape suivante du raisonnement consiste à fixer l'orientation du flux.

Pour cela, trois choix sont possibles :

- Orientation du flux rotorique:

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{III.2})$$

➤ Orientation du flux statoriques :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{III.3})$$

➤ Orientation du flux d'entrefer:

$$\varphi_{dg} = \varphi_g \text{ et } \varphi_{qg} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Pour la MASDE, nous optons pour le choix de l'orientation du flux rotorique (III.2), 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. En considérant comme grandeurs de références le flux rotorique φ_r^* et le couple C_{em}^* et en exprimant que :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r^* \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases}$$

La relation finale du couple électromagnétique devient :

$$\begin{aligned} C_{em1}^* &= p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r i_{qs1} \\ C_{em2}^* &= p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r i_{qs2} \\ C_{em}^* &= k C_{em1}^* + (1 - k) C_{em2}^* \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

k : Coefficient de réglage de la répartition de puissance.

D'après l'équation (III.5), nous constatons 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.

III.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle

La commande vectorielle de la MASDE peut être soit directe ou indirecte.

III.4.1 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 :

- 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 [17].

III.4.2 Méthode de commande indirecte

La méthode indirecte consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux, mais seulement sa position, dans ce cas le flux est contrôlé en boucle ouverte.

III.5 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. En considérant comme grandeurs de références le flux rotorique φ_r^* et le couple C_{em}^* , la figure III.2 représente le schéma de principe de la commande à flux orienté.

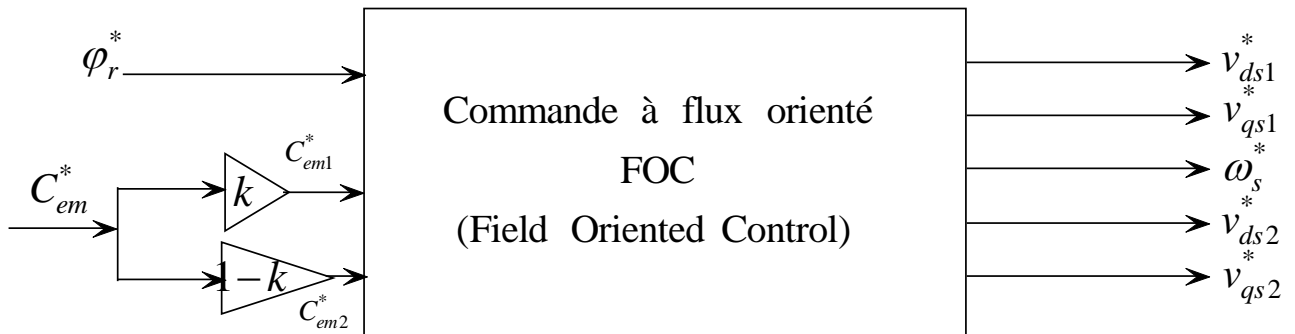


Fig III.2 Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

En exprimant que :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r^* \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (III.6)$$

En remplaçant (III.6) dans les équations des tensions rotoriques (II.14), on obtient [28]:

$$R_r \cdot i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \quad (III.7)$$

$$R_r \cdot i_{qr} + \omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \cdot \varphi_r^*}{R_r} \quad (III.8)$$

Et à partir des équations (II.29) et (II.30), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{\varphi_r^*}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III.9})$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (\text{III.10})$$

En introduisant (III.9) et (III.10) dans le système d'équations des flux statoriques (II.21), on aura [28]:

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 \cdot i_{ds1} + L_r B i_{ds2} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 \cdot i_{qs1} + L_r B i_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 \cdot i_{ds2} + L_r B i_{ds1} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 \cdot i_{qs2} + L_r B i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$B = \frac{L_m}{L_m + L_r} \text{ et } \lambda_{1,2} = L_{s1,2} + B L_r$$

En introduisant (III.7) dans (III.9), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III.12})$$

A partir du système d'équation (III.10), on trouve :

$$L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) = -(L_m + L_r) i_{qr} \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant (III.10) et (III.11) dans le système d'équations des tensions statoriques, on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = R_{s1} \cdot i_{ds1} + (L_{s1} + L_m) s i_{ds1} - \omega_s^* ((L_{s1} + L_m) \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1}^* = R_{s1} \cdot i_{qs1} + (L_{s1} + L_m) s i_{ds1} + \omega_s^* ((L_{s1} + L_m) \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2}^* = R_{s2} \cdot i_{ds2} + (L_{s2} + L_m) s i_{ds2} - \omega_s^* ((L_{s2} + L_m) \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2}^* = R_{s2} \cdot i_{qs2} + (L_{s2} + L_m) s i_{ds2} + \omega_s^* ((L_{s2} + L_m) \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Avec:

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

En introduisant l'équation (III.10) dans (III.8), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r \cdot L_m}{(L_m + L_r)} \frac{(i_{qs1} + i_{qs2})}{\varphi_r^*} \quad (\text{III.15})$$

A partir de la relation (III.5), on trouve :

$$i_{qs1} = \frac{(L_m + L_r) C_{em1}^*}{p L_m} \frac{1}{\varphi_r^*} \quad (\text{III.16})$$

$$i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r) C_{em2}^*}{pL_m \phi_r^*} \quad (\text{III.17})$$

Le système d'équations électriques (III.14) 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. Cela en définissant de nouvelles variables $(v_{ds1r}, v_{qs1r}, v_{ds2r}, v_{qs2r})$ n'agissent respectivement que sur $(i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2})$, tel que :

$$\begin{cases} v_{ds1r} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + (L_{s1} + L_m) \cdot s i_{ds1} \\ v_{qs1r} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + (L_{s1} + L_m) \cdot s i_{qs1} \\ v_{ds2r} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + (L_{s2} + L_m) \cdot s i_{ds2} \\ v_{qs2r} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + (L_{s2} + L_m) \cdot s i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

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

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = v_{ds1r} - v_{ds1c} \\ v_{qs1}^* = v_{qs1r} + v_{qs1c} \\ v_{ds2}^* = v_{ds2r} - v_{ds2c} \\ v_{qs2}^* = v_{qs2r} + v_{qs2c} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Où :

$$\begin{cases} v_{ds1c} = \omega_s^* ((L_{s1} + L_m) \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \phi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1c} = \omega_s^* ((L_{s1} + L_m) \cdot i_{ds1} + \phi_r^*) \\ v_{ds2c} = \omega_s^* ((L_{s2} + L_m) \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \phi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2c} = \omega_s^* ((L_{s2} + L_m) \cdot i_{ds2} + \phi_r^*) \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

III.5.1 Identification des paramètres des régulateurs PI

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, telle que $H(s) = \frac{1}{as+b}$ se fait d'une manière générale comme suit :

La fonction de transfert du PI est :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.22})$$

Le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre à retour unitaire réglé par un PI est donné par la figure III.3.

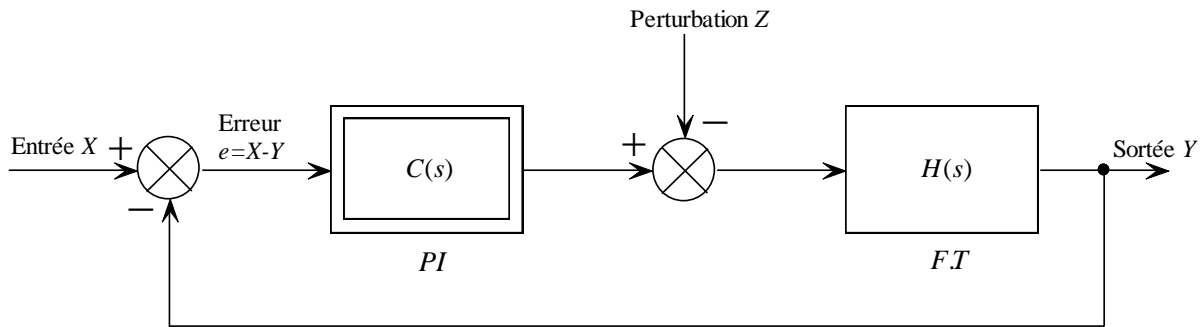


Fig.III.3. Schéma d'un système asservi du premier ordre réglé par un PI

La perturbation est négligée dans les étapes d'identification des paramètres des régulateurs. La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est :

$$T(s) = C(s).H(s) = \frac{K_P.s + K_i}{as^2 + bs} \quad (\text{III.23})$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1+T(s)} = \frac{K_P.s + K_i}{as^2 + (b + K_P)s + K_i} \quad (\text{III.24})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (\text{III.25})$$

Il suffit d'identifier (III.24) à (III.25) comme suit :

$$\frac{K_P.s + K_i}{as^2 + (b + K_P)s + K_i} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (\text{III.26})$$

Ce qui donne :

$$K_P.Ts^2 + (K_i.T + K_P)s + K_i = as^2 + (b + K_P)s + K_i \quad (\text{III.27})$$

D'où :

$$\begin{cases} K_P = \frac{a}{T} \\ K_i = \frac{b}{T} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

La figure III.4 représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques (étoiles 1 et 2).

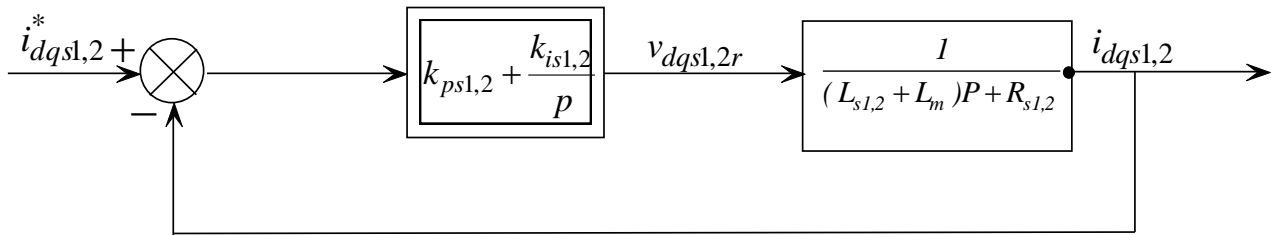


Fig. III.4. Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

$$\text{Avec : } \begin{cases} K_{Ps1} = \frac{L_{s1}+L_m}{T} \\ K_{is1} = \frac{R_{s1}}{T} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} K_{Ps2} = \frac{L_{s2}+L_m}{T} \\ K_{is2} = \frac{R_{s2}}{T} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

On prend $T = \frac{\tau_r}{3}$ pour avoir une dynamique du processus rapide, avec $\tau_r = \frac{(L_r+L_m)}{R_r}$ est la constante de temps électrique (rotorique) du système.

III.5.2 Application de la commande indirecte sur la MASDE

L'application de la commande vectorielle indirecte sans le réglage de vitesse sur la machine asynchrone à double étoile est illustrée par la figure III.5

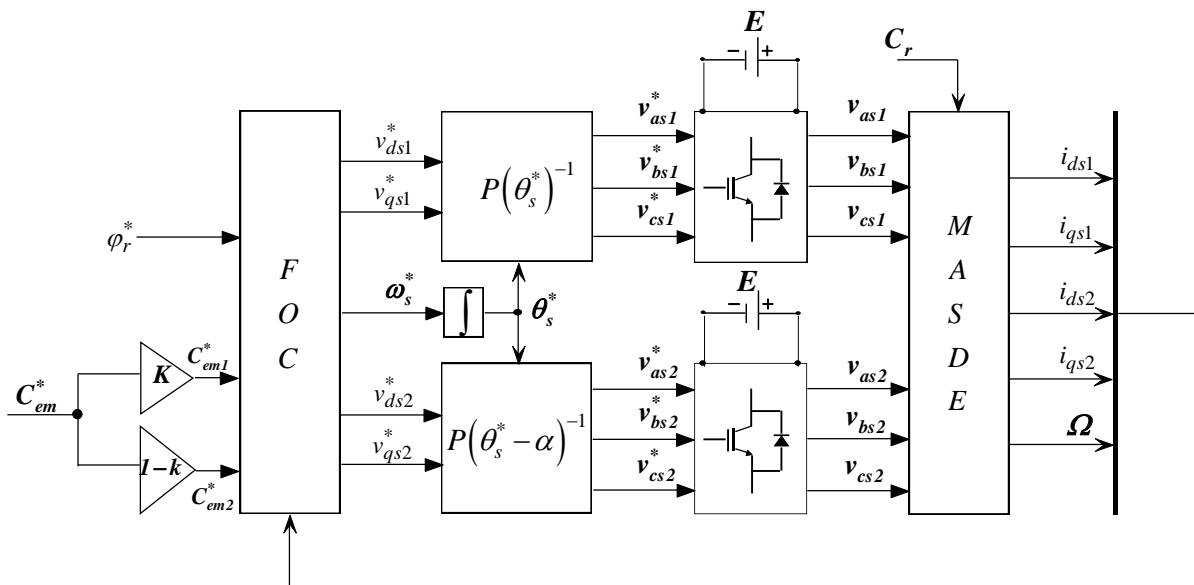


Fig. III.5. Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE

Le schéma bloc de découplage en tension (Field oriented control : FOC) est représenté sur la figure III.6.

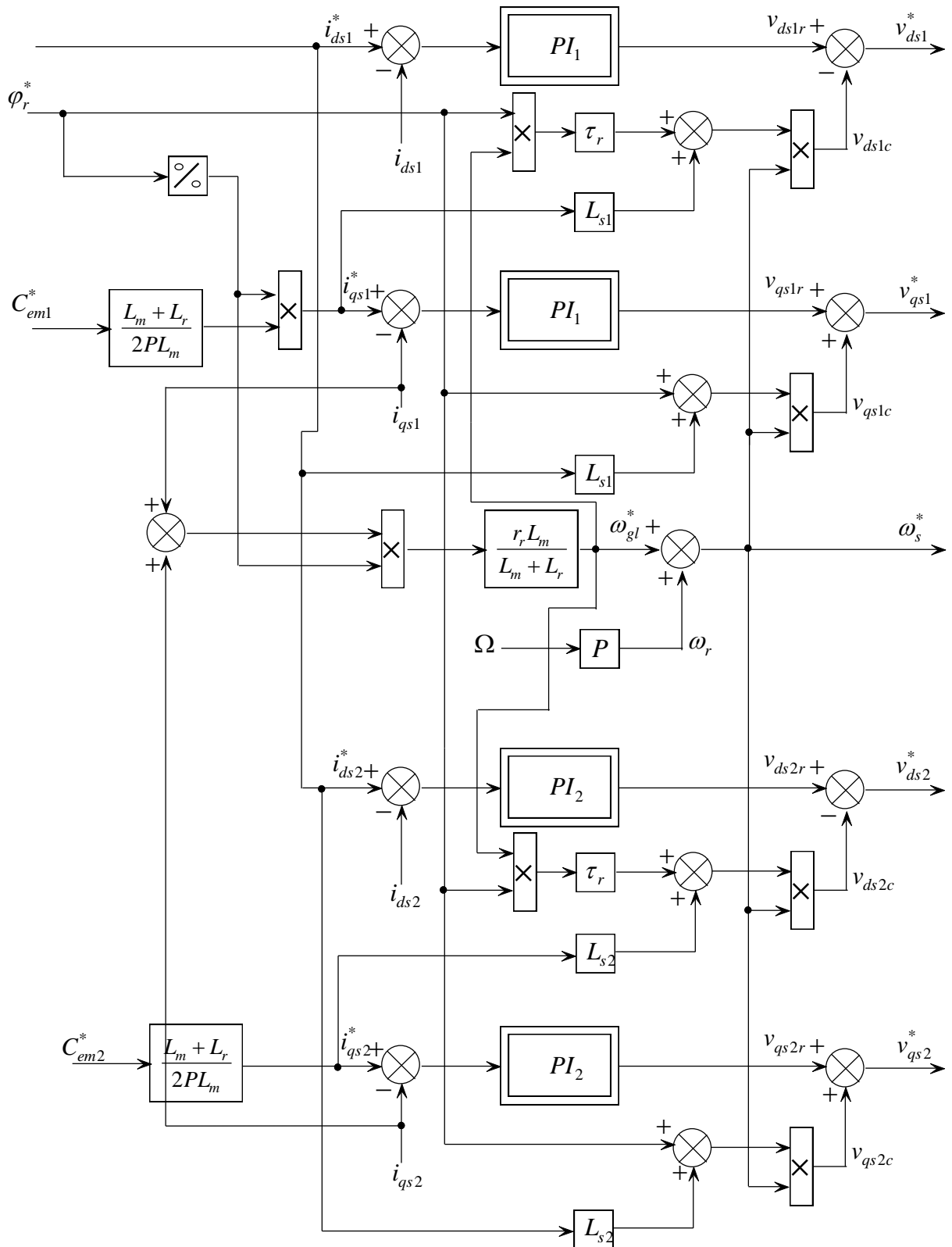


Fig III.6 Représentation schématique du bloc de découplage FOC

III.6 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotoriques 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 :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n & \text{si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \varphi_n \frac{\Omega_n}{|\Omega|} & \text{si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Et schématisé par la figure III.7 :

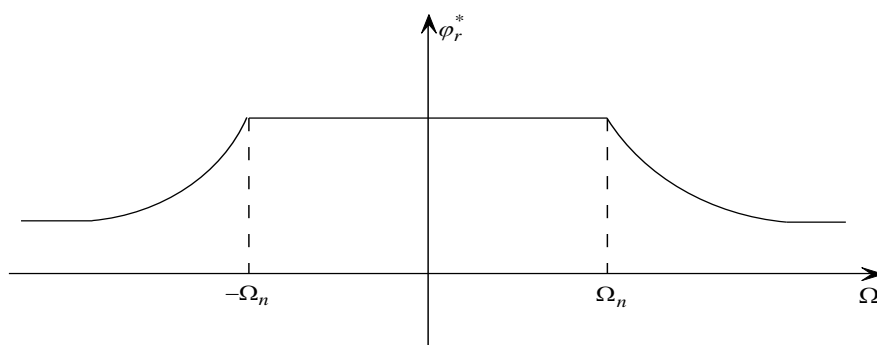


Fig. III.7. Schéma de défluxage

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.8 :

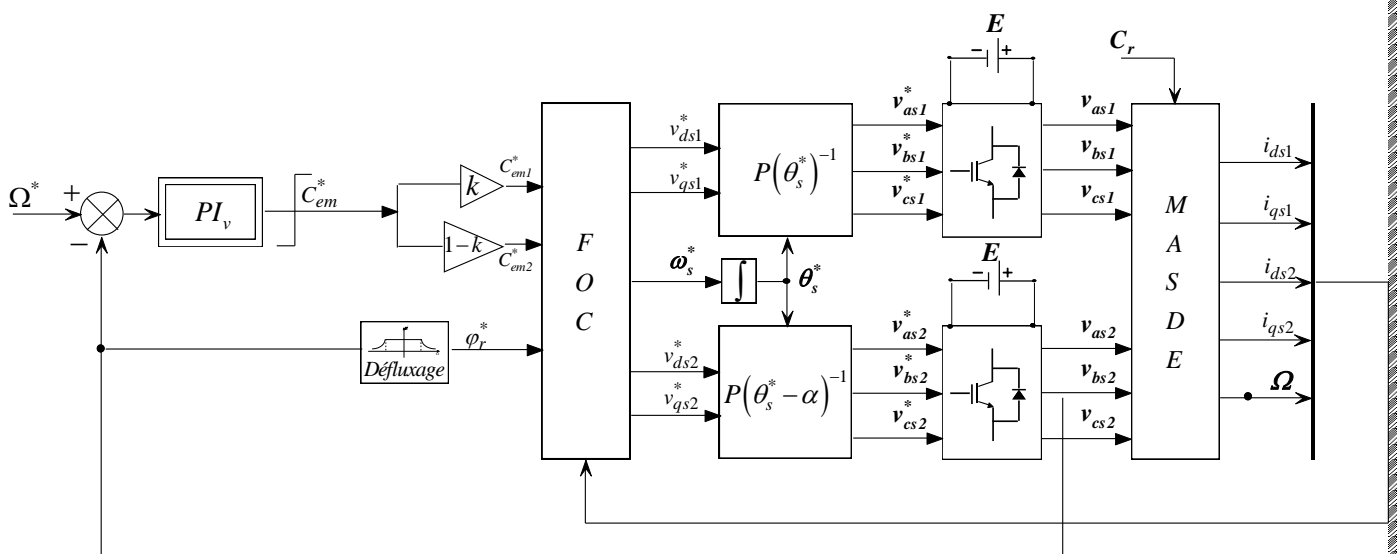


Fig. III.8. Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse

III.6.1 Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure III.9 :

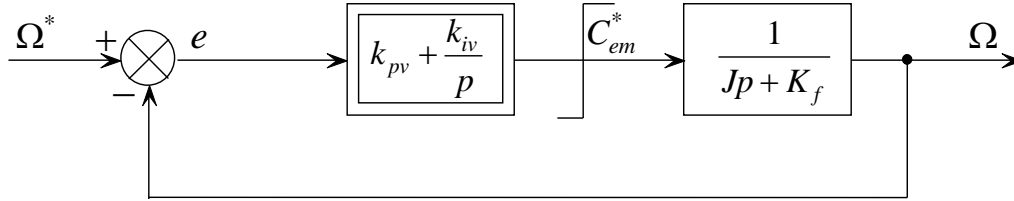


Fig.III.9. Boucle de régulation de vitesse

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{J}{\tau} \\ K_{iv} = \frac{K_f}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

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

La commande doit être limitée par un dispositif de saturation définie par [29].

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* & \text{si } |C_{em}^*| \leq C_{em}^{Max} \\ C_{em}^{Max} \text{sign}(C_{em}^*) & \text{si } |C_{em}^*| > C_{em}^{Max} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

III.7 Simulation et interprétation des résultats

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les paramètres de la machine utilisée sont indiqués dans l'annexe (A)

L'étude des performances de la machine a été effectuée à vide et en charge.

1^{er} cas :

$$C_{em1}^* = C_{em1}^* = 1/2 C_{em} = 7N.m \text{ dans l'intervalle } [1.5, 2.5]s \text{ (Moteur)}$$

$$C_{em1}^* = C_{em1}^* = 1/2 C_{em} = -7N.m \text{ dans l'intervalle } [3, 5]s \text{ (Génératrice)}$$

La figure III.10 représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ N.m respectivement entre les intervalles de temps $t= [1.5, 2.5]$ et $[3,5]$ s.

a) A vide

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire, et elle atteint 2995tr/min qui est très proche de celle du synchronisme à $t=1.2s$ (début du régime permanent).

Le couple électromagnétique, au début et pendant le régime transitoire il atteint sa valeur maximale et présente des oscillations qui disparaissent au bout de quelques 0.3s puis il rejoint la valeur 29N.m, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise à la valeur minimale de 0.32N.m, qui est due aux frottements.

Les courants statoriques (étoile 1 et étoile 2) présentent des dépassements excessifs induisant de forts appels de courants, qui sont d'environ quatre fois le courant nominal, mais qui disparaissent au bout de quelques alternances pour donner lieu à des formes sinusoïdales d'amplitude constante.

b) En appliquant la charge $C_r=14N.m$ (Machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant $t=1.5s$ on constate que :

La vitesse et les courants selon (d, q) diminuent et se stabilisent respectivement à $N=2742.2$ tr/mn.

Des augmentations sont observées par le couple électromagnétique, les courants statoriques (étoile 1 et étoile 2) à $t=1.5s$.

Le glissement de la machine devient un peu plus important qu'à vide, la tension d'alimentation v_{as1} et le courant statorique i_{as1} sont de même signe, cependant, le déphasage en arrière du courant par rapport à la tension est dû à l'effet inductif de la machine, les deux grandeurs sont de même signe explique que le sens de transition de la puissance est positif, c'est-à-dire la machine absorbe de l'énergie active et de l'énergie réactive de la source.

a) En appliquant la charge $C_r=-14 N.m$ (machine en fonctionnement génératrice) au-delà de l'instant $t=3s$:

La vitesse, les courants statoriques augmentent et se stabilisent.

Le couple électromagnétique et les courants statoriques observent des diminutions, qui s'établissent à $t=3s$:

$C_{em}=-14 N.m$,

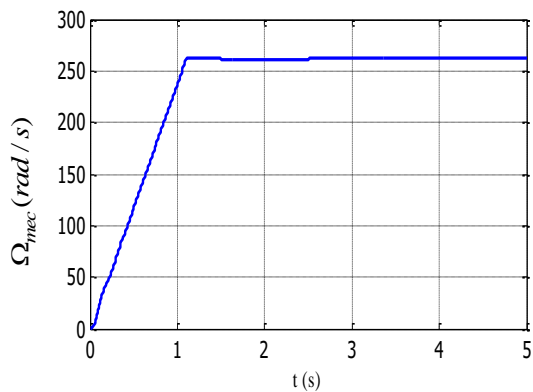
Le glissement de la machine diminue et devient négatif (vitesse du synchronisme est supérieure à la vitesse de rotation), et la tension statorique (v_{as1} en V) et le courant statorique, (i_{as1} en A) sont déphasés presque de 180° et de signes inverse, et cela veut dire que la puissance produite est de signe négatif, c'est-à-dire la

machine fournie de l'énergie active vers la source et absorbe une part de l'énergie réactive pour sa magnétisation.

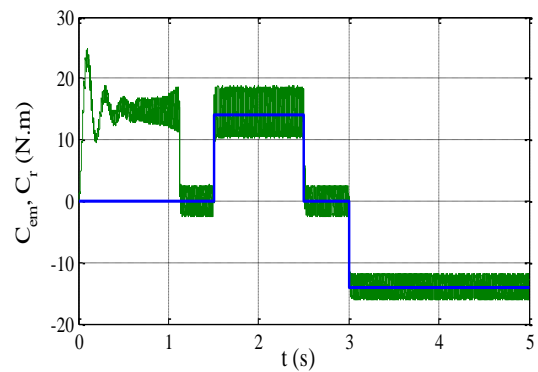
La figure (III.10.g) illustre l'évolution de la transition de la puissance active au niveau de l'étoile (1).

On constate qu'à l'application du couple résistant $C_r=14$ N.m La MASDE est fournie en puissance active de la part de batterie à travers l'étoile 1, et à l'application du couple résistant $C_r=-14$ N.m la transition de puissance change de sens de sorte que l'excès en puissance est stocké vers la batterie.

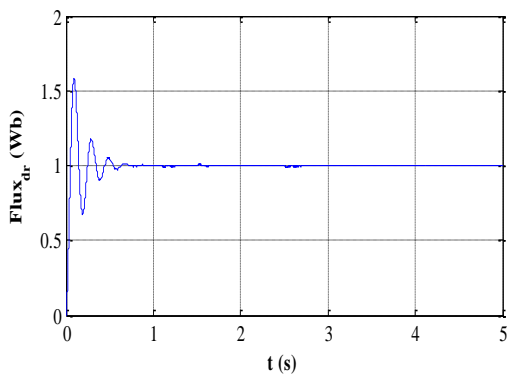
1^{er} cas



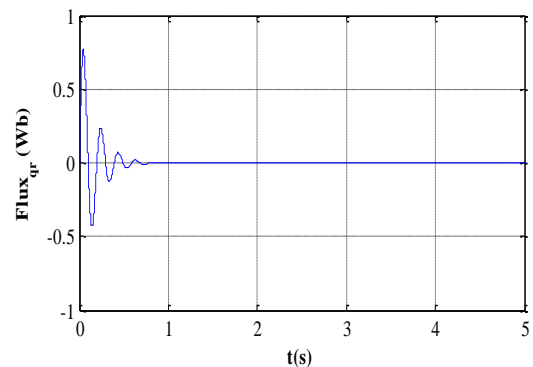
a) Evolution de la vitesse en (Rad/s)



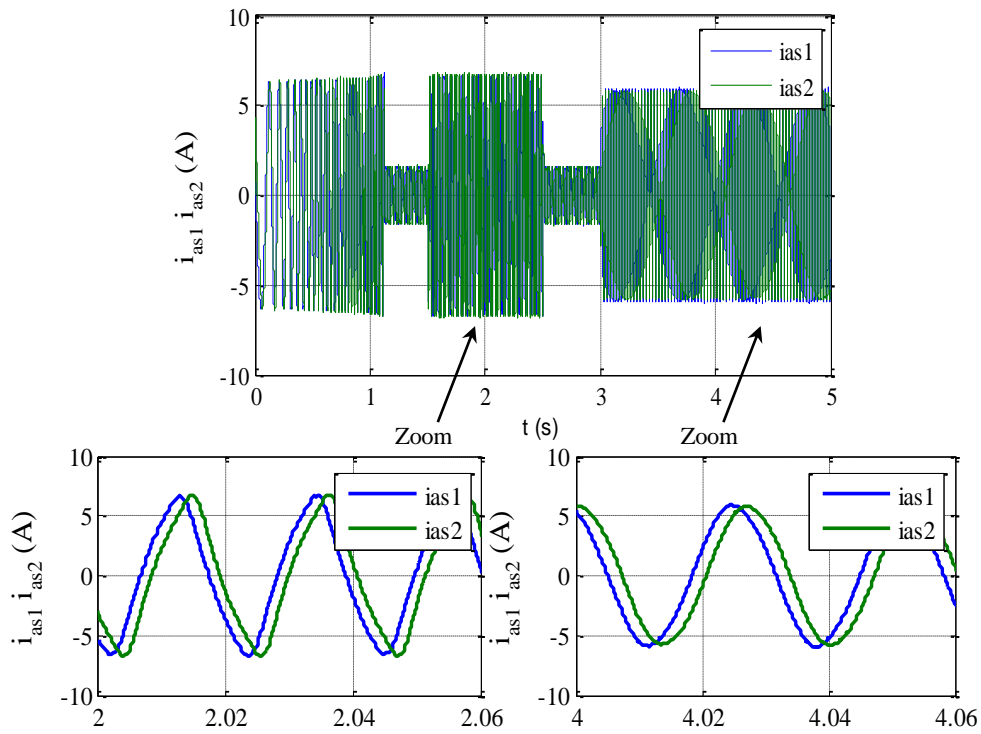
b) Evolution des couples électromagnétique **c)** et résistant (N.m)



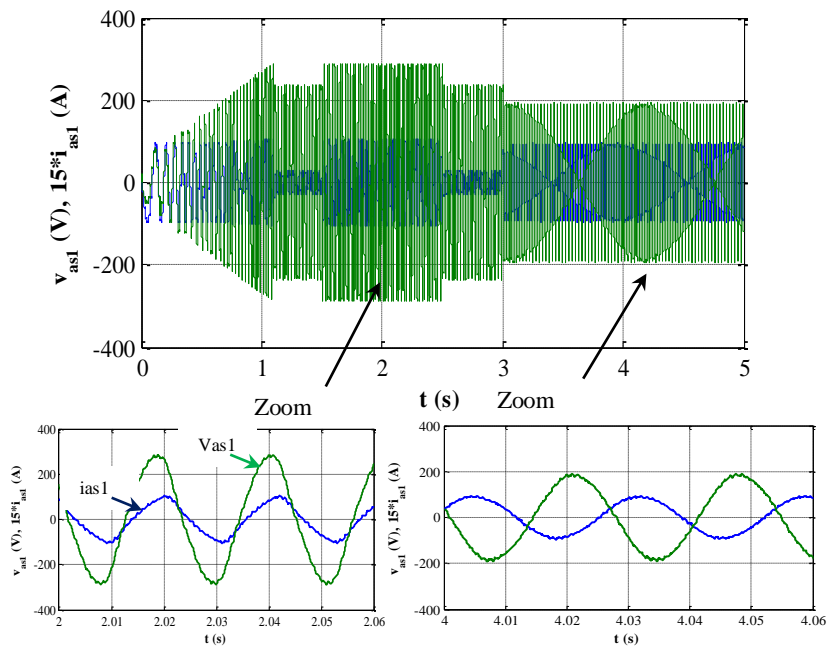
c) Evolution du flux rotorique direct (Wb)



d) Evolution flux rotorique quadratique (Wb)



e) Evolution des Courant statoriques i_{as1} et i_{as2} (A)



f) Evolution de la tension v_{as1} (V) et courant i_{as1} statorique de l'étoile 1

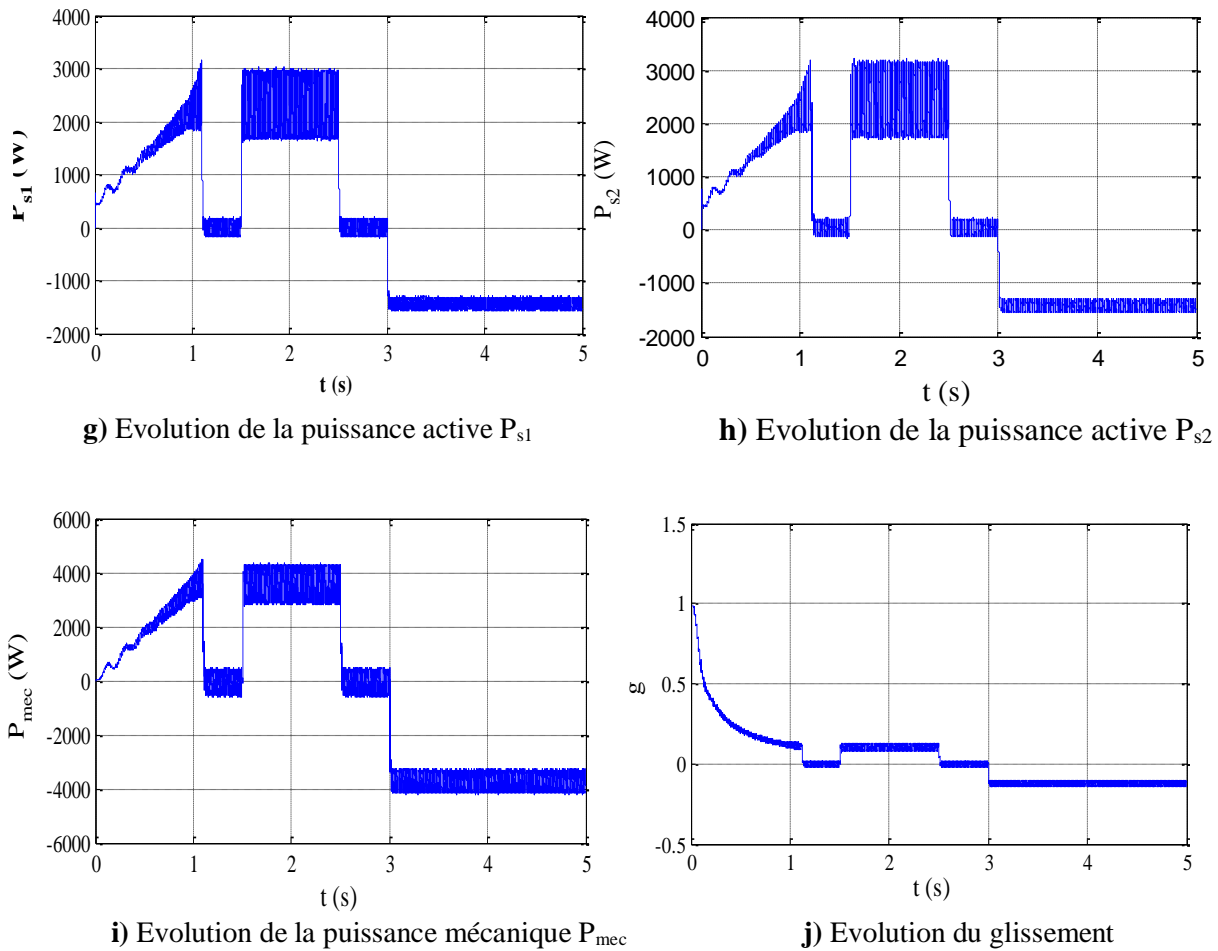


Fig. III. 10 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et $-14N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s

2^{eme} Cas :

$$C_{em1}^* = \frac{1}{2}C_{em} = 7N.m ; C_{em2}^* = \frac{1}{4}C_{em} = 3.5N.m \text{ Dans l'intervalle } [1.5, 2.5] \text{ (Moteur)}$$

$$C_{em1}^* = \frac{1}{2}C_{em} = -7N.m ; C_{em2}^* = \frac{1}{4}C_{em} = -3.5N.m \text{ Dans l'intervalle } [3, 5] \text{ (Génératrice)}$$

La figure (III.11) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE suivi de l'application des charges $C_r=10.5 N.m$ et $C_r=-10.5 N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t= [1.5, 2.5]$ et $[3,5]$ s.

En appliquant la charge $C_r=10.5\text{N.m}$ (Machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant $t=1.5\text{s}$ on constate que :

La vitesse et les courants selon (d, q) diminuent et se stabilisent respectivement à $N=2742.2$ tr/mn.

Des augmentations sont observées par le couple électromagnétique, les courants statoriques (étoile 1 et étoile 2) diminue à $t=1.5\text{s}$.

Le glissement de la machine devient un peu plus important qu'à vide, la tension d'alimentation v_{s1} et le courant statorique i_{s1} sont de même signe, cependant, le déphasage en arrière du courant par rapport à la tension est dû à l'effet inductif de la machine, les deux grandeurs sont de même signe explique que le sens de transition de la puissance est positif, c'est-à-dire la machine absorbe de l'énergie active et de l'énergie réactive de la source.

- a) En appliquant la charge $C_r=-10.5\text{ N.m}$ (machine en fonctionnement génératrice) au-delà de l'instant $t=3\text{s}$:

La vitesse, les courants statoriques augmentent et se stabilisent.

Le couple électromagnétique et les courants statoriques observent des diminutions, qui s'établissent à $t=3\text{s}$:

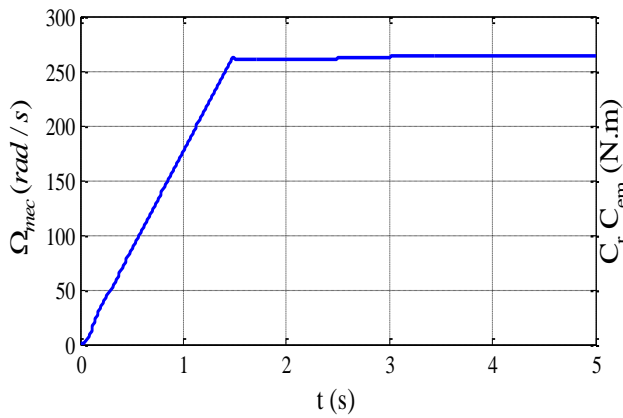
$C_{em}=-10.5\text{ N.m}$,

Le glissement diminue et devient négatif (vitesse du synchronisme est supérieure à la vitesse de rotation), et la tension statorique (v_{s1} en V) et le courant statorique, (i_{s1} en A) sont déphasés presque de 180° et de signes inverse, et cela veut dire que la puissance produite est de signe négatif, c'est-à-dire la machine fournit de l'énergie active vers la source et absorbe une part de l'énergie réactive pour sa magnétisation.

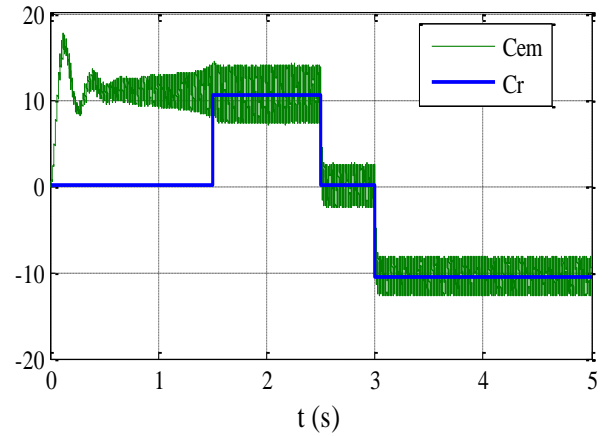
La figure (III.11.g) illustre l'évolution de la transition de la puissance active au niveau de l'étoile (1).

On constate qu'à l'application du couple résistant $C_r=10.5\text{ N.m}$ La MASDE est fournie en puissance active de la part de batterie à travers l'étoile 1, et à l'application du couple résistant $C_r=-10.5\text{N.m}$ la transition de puissance change de sens de sorte que l'excès en puissance est stocké vers la batterie.

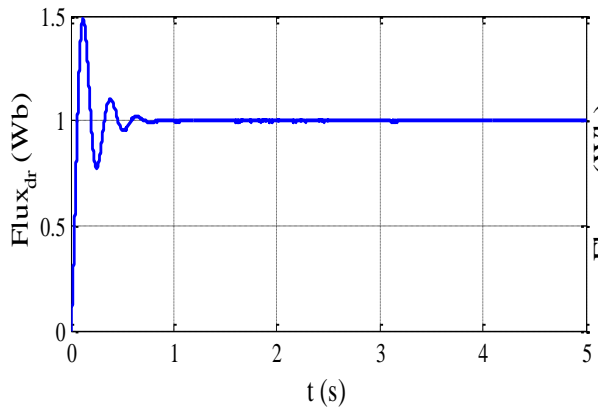
2^{eme} Cas :



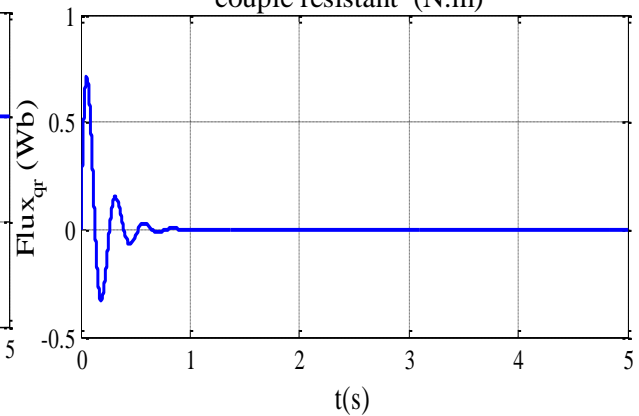
a) Evolution de la vitesse en (Rad/s)



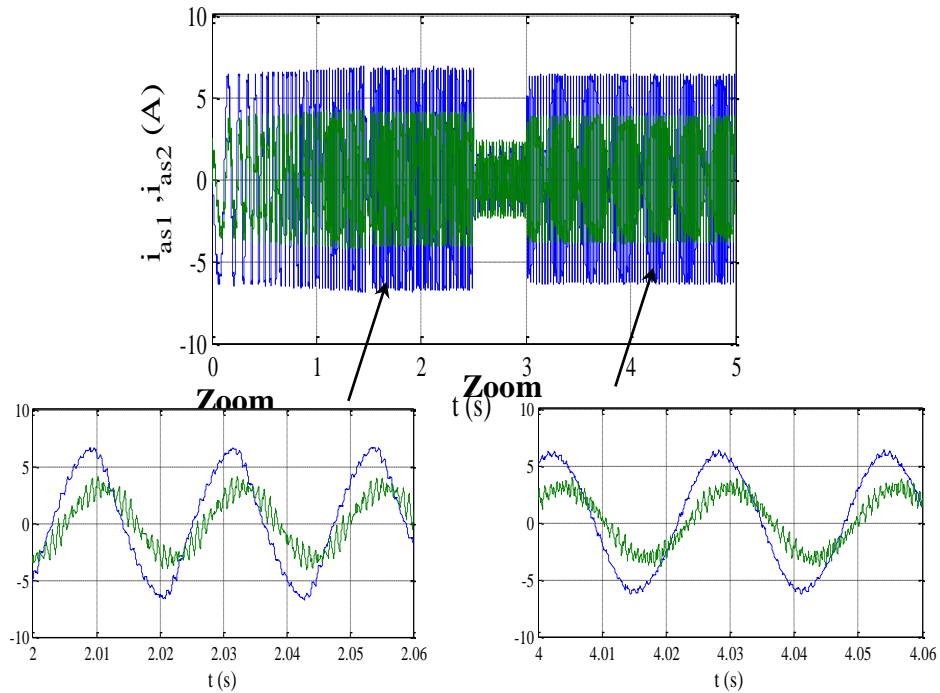
b) Evolution du couple électromagnétique et du couple résistant (N.m)



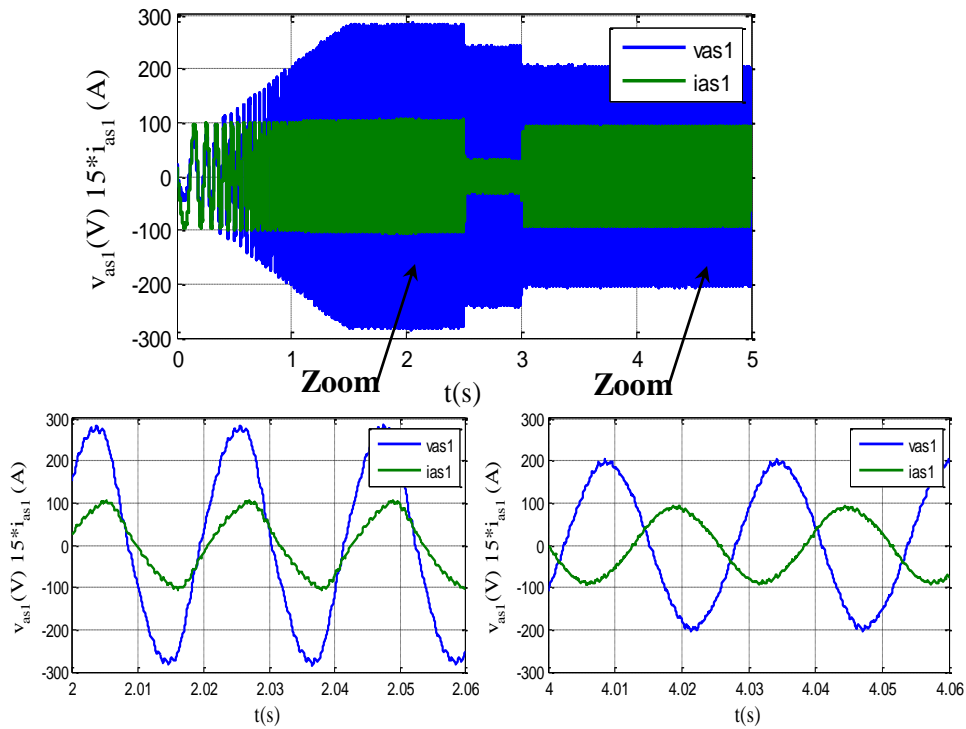
c) Evolution du flux rotorique direct (Wb)



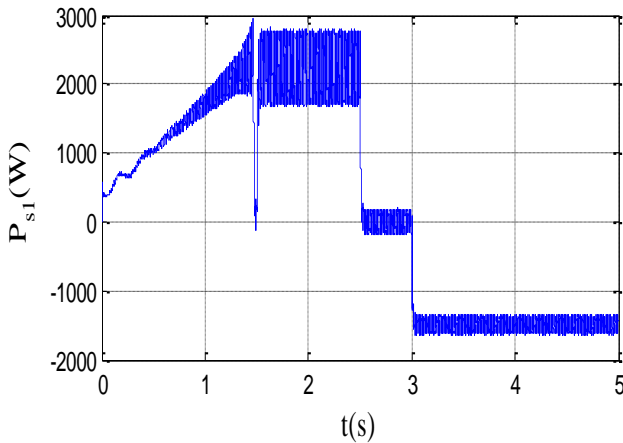
d) Evolution flux rotorique quadratique (Wb)



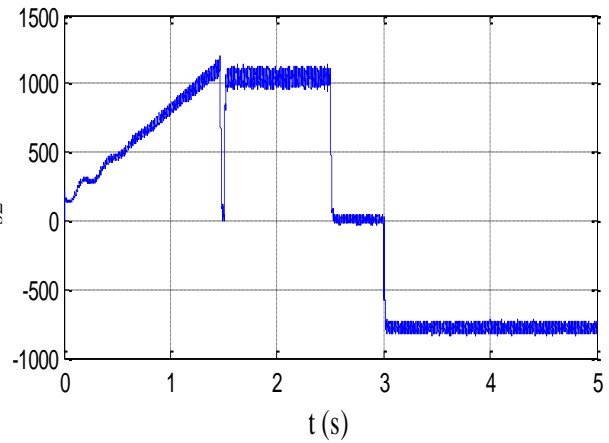
e) Evolution des Courant statorique i_{as1} et i_{as2} (A)



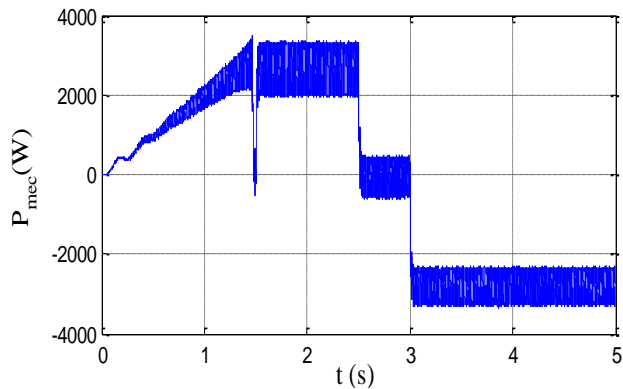
f) Evolution de la tension v_{as1} (V) et courant i_{as1} statorique de l'étoile 1



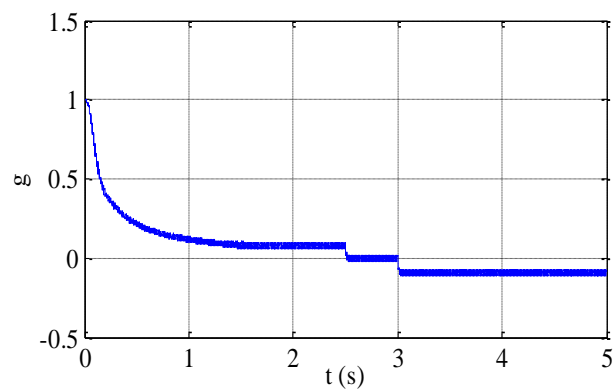
g) Evolution de la puissance active P_{s1}



h) Evolution de la puissance active P_{s2}



i) Evolution de la puissance mécanique P_{mec}



j) Evolution du glissement

Fig. III.11 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 10.5$ et -10.5 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s

3^{eme} Cas :

$$C_{em1}^* = \frac{1}{2} C_{em} = 7N.m ; C_{em2}^* = 0N.m \text{ Dans l'intervalle } [1.5, 2.5] \text{ (Moteur)}$$

$$C_{em1}^* = \frac{1}{2} C_{em} = -7N.m ; C_{em2}^* = 0N.m \text{ Dans l'intervalle } [3, 5] \text{ (Génératrice)}$$

La figure (III.12) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE suivi de l'application des charges $C_r=7 \text{ N.m}$ et $C_r=-7 \text{ N.m}$ respectivement entre les intervalles de temps $t= [1.5, 2.5]$ et $[3,5]$ s.

En appliquant la charge $C_r=7\text{N.m}$ (Machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant $t=1.5\text{s}$ on constate que :

La vitesse et les courants selon (d, q) diminuent et se stabilisent respectivement à $N=1824.7 \text{ tr/mn}$.

Des augmentations sont observées par le couple électromagnétique, les courants statoriques (étoile 1 et étoile 2) diminuent à $t=1.5\text{s}$.

Le glissement de la machine devient un peu plus important qu'à vide, la tension d'alimentation v_{s1} et le courant statorique i_{as1} sont de signe, cependant, le déphasage en arrière du courant par rapport à la tension est dû à l'effet inductif de la machine, les deux grandeurs sont de même signe explique que le sens de transition de la puissance est positif, c'est-à-dire la machine absorbe de l'énergie active et de l'énergie réactive de la source.

- a) En appliquant la charge $C_r=-7 \text{ N.m}$ (machine en fonctionnement génératrice) au-delà de l'instant $t=3\text{s}$:

La vitesse, les courants statoriques augmentent et se stabilisent.

Le couple électromagnétique et les courants statoriques observent des diminutions, qui s'établissent à $t=3\text{s}$:

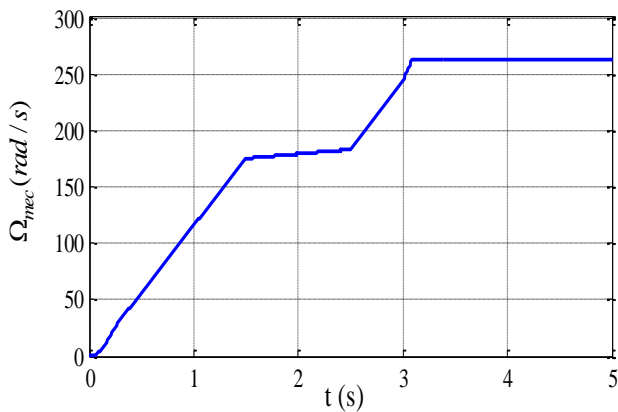
$$C_{em}=-7 \text{ N.m,}$$

Le glissement diminue et devient positif (vitesse du synchronisme est supérieure à la vitesse de rotation), et la tension statorique (v_{s1} en V) et le courant statorique, (i_{as1} en A) sont déphasés presque de 180° et de signes inverse, et cela veut dire que la puissance produite est de signe négatif, c'est-à-dire la machine fournit de l'énergie active vers la source et absorbe une part de l'énergie réactive pour sa magnétisation.

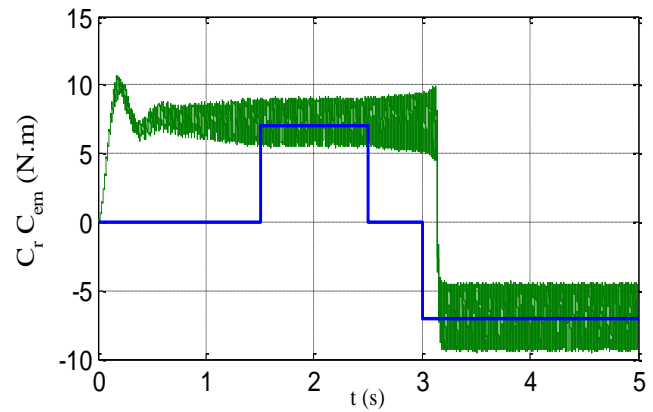
La figure (III.12.g) illustre l'évolution de la transition de la puissance active au niveau de l'étoile (1).

On constate qu'à l'application du couple résistant $C_r=7$ N.m. La MASDE est fournie en puissance active de la part de batterie à travers l'étoile 1, et à l'application du couple résistant $C_r=-7$ N.m la transition de puissance change de sens de sorte que l'excès en puissance est stocké vers la batterie.

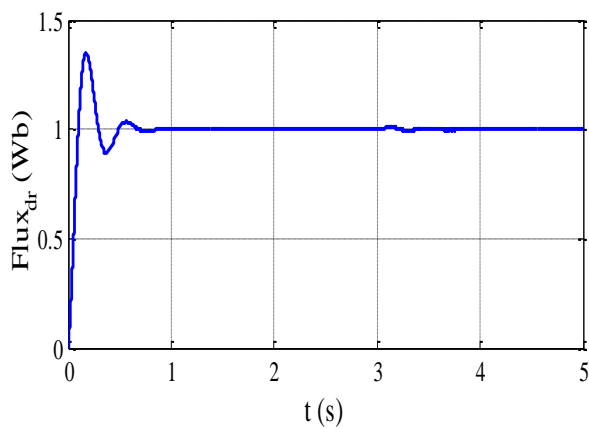
3^{eme} Cas :



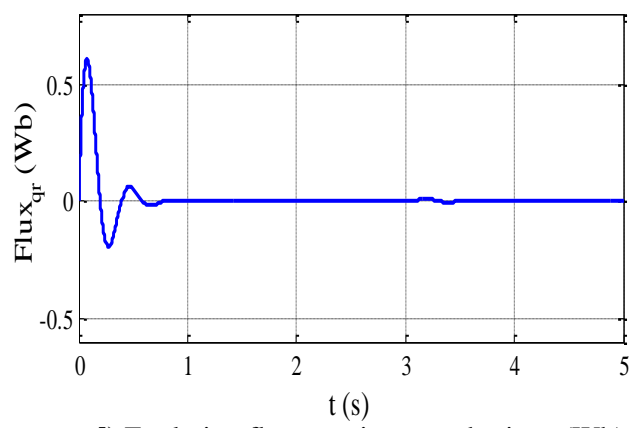
a) Evolution de la vitesse en (Rad/s)



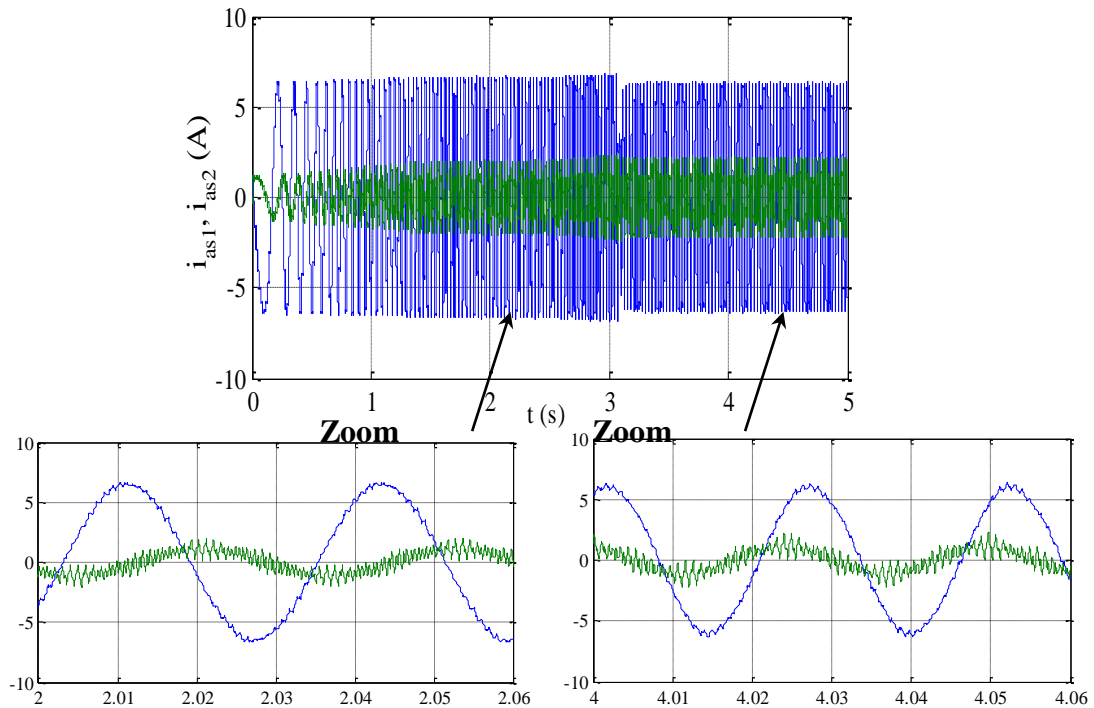
b) Evolution des couples électromagnétique et résistant (N.m)



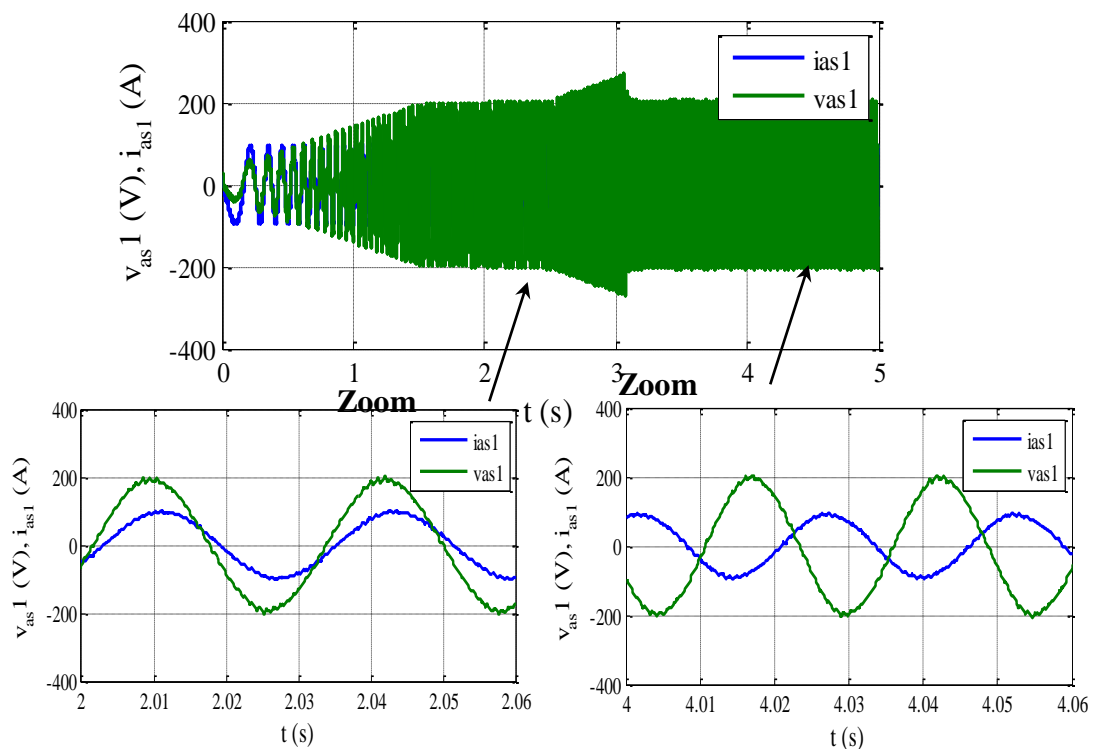
c) Evolution du flux rotorique direct (Wb)



d) Evolution flux rotorique quadratique (Wb)



e) Evolution des Courant statorique i_{as1} et i_{as2} (A)



f) Evolution de la tension v_{as1} (V) et courant i_{as1} statorique de l'étoile 1

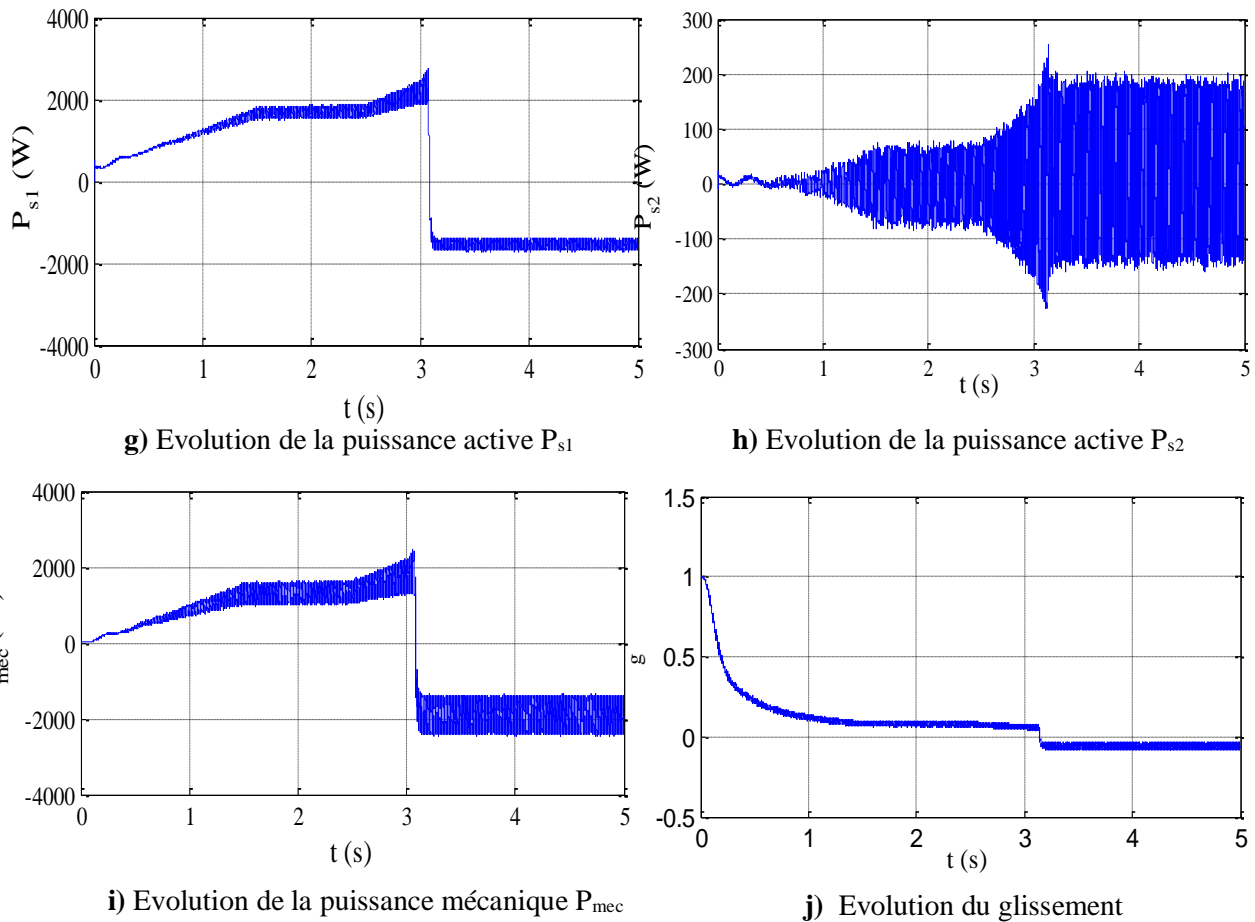


Fig. III.12 Evolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle suivi de l'application des charges $C_r = 14$ et -14 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [1.5, 2.5]$ et $[3, 5]$ s

III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique de la machine asynchrone double étoile, l'objectif est la régulation de la vitesse. L'étude de cette commande nous a mené à mettre en évidence les caractéristique de la commande vectorielle de la MASDE.

La régulation de vitesse par la commande vectorielle indirecte présente de meilleures performances par rapport à l'alimentation directe du réseau et par les onduleurs, et cela en terme de précision et de stabilité.

Les algorithmes de réglages classiques tels que les régulateurs PI peuvent s'avérer suffisant si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop exigeantes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a permis d'évaluer les performances de système autonome basés sur la machine asynchrone double étoile.

Dans le premier chapitre, nous avons effectué un état de l'art sur les systèmes autonomes et les machines qui assurent la conversion électromécanique. Ce qui nous a orientés vers le choix de la machine asynchrone double étoile pour des raisons de fiabilité et de robustesse.

Le second chapitre était consacré à la description et la modélisation de la MASDE. Son modèle mathématique en adoptant certaines hypothèses simplificatrices est présenté, cette étude a permis de valider le modèle de la MASDE proposé en fonctionnement moteur et génératrice, la simulation de la machine alimentée par deux onduleurs de tension à commande M.L.I et présentée.

Nous avons proposé dans le dernier chapitre l'analyse et le contrôle de la chaîne de production à base de la MASDE, l'application d'une stratégie de contrôle vectorielle en se basant sur le principe de l'orientation du flux rotorique a été proposée. Après avoir présenté une simulation du système et son contrôle, les performances de ce dernier ont été évaluées :

Dans le premier cas nous avons étudié les deux étoiles des deux stators étant identiques, dans le deuxième cas et le troisième ces dernières sont différentes et indépendantes l'une de l'autre et on conclue que quand le couple résistant est positive La MASDE fournit de la puissance active de la part de batterie à travers l'étoile 1, dans le cas où le couple résistant négative la transition de puissance change de sens de sorte que l'excès en puissance est stocké vers la batterie.

Annexe

Annexe

Paramètre de la machine asynchrone double étoile

- Puissance nominale $P_n=4.5\text{KW}$;
- Tension nominale $V_n=220\text{V}$;
- Courant nominale $I_n=6.81\text{A}$;
- Fréquence nominale $f_n=50\text{Hz}$;
- Nombre de paire de pôles $p= 1$;
- Décalage électrique $\alpha=30^\circ$.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. Multon, "Histoire des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable", revue 3 E.I, no.3, pp.3-8, Juin 1995.
- [2] T. Davenport, "Improvement in Propelling Machinery by Magnetism and Electro-Magnetism", US 132 A, Octroi, 1837.
- [3] M. Bernard, "Historique des Machines Electromagnétiques et plus Particulières des Machines a Réluctance Variable, Revue 3 E. In°3. pp. 3–8, 1995.
- [4] D. Hadiouche "Contribution à l'Etude de la Machine Asynchrone Double Etoile Modélisation, Alimentation et Structure", Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1., 2001.
- [5] A. Ricaud, "Polytech Savoie 5eme année", 2011.
- [6] :F. Amir, " Etude du Fonctionnement des Centres de Production Dans un Système de Marché Libre de L'énergie Electrique", Ingénieur en Electrotechnique .Université Batna, 2012.
- [7] B.Tounsi, " Etude Comparative de Groupes Electrogènes Embarqués à Large Gamme de Vitesse Variable Associant Machines à Aimants Permanents et Conversion Statique ", Thèse Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse ,2006.
- [8] A. Maafa, " Etude d'un Générateur Eolien Basé sur la Cascade de Deux Machines Asynchrones Pilotées par un Convertisseur de Fréquence ", Mémoire de magistère de l'Université de Batna, 2011.
- [9] P. Bortoli, Bilan électrique 2012 de la région Borgogne.
- [10] H .Benqassimi, "Conception De Convertisseurs Alternatif-Continu Mono-Etage à Absorption Sinusoïdale", Thèse de doctorat de l'Ecole Hassania-Casablanca-Maroc, 1998.
- [11] J. Herman Guay, perspective monde " outil pédagogique des grandes tendances du monde depuis 1945".
- [12] B. Blunier et A. Miraoui, " 20 Questions sur la pile à combustible, Editions TECHNIP", 2009.
- [13] Principes d'Electrotechnique, Cours et Exercices Corrigés, Dunod, Paris, 2005.

Bibliographie

- [14] K. Idjdarene, "Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes ", Thèse Doctorat, Université de Lille 1, 2010.
- [15] Multon B. et all, " Aérogénérateurs Electriques ", Techniques d'Ingénieur, Référence D3960, 2004.
- [16] Poitiers F, " Etude et Commande de Génératrices Asynchrone pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne ", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [17] G.Salloum, R.Bausiere, "Les Convertisseurs de l'Électronique de Puissance", la Conversion DC-AC, volume 04.pp 147-200 France, 1995.
- [18] A. Mirecki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005, France.
- [19] S. Chekkal, " Intégration des Génératrices Asynchrones à Double Etoiles dans un Système Eolien", Thèse de doctorat de l'Université de Bejaia, 2015.
- [20] H. Amimeur, D. Aouzellag, R. Abdessemed, K. Ghedamsi, Sliding mode control of a dual-stator induction generator for wind energy conversion systems, International Journal of Electrical Power and Energy Systems IJEPES, vol.42, No. 1, pp. 60–70, 2012.
- [21] H. Amimeur Mémoire Magister en Electrotechnique " Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement " 28 /05 / 2008.
- [22] L. Tutelea, I. Boldea, N. Muntean, S.I. Deaconu, Modeling and performance of novel scheme dual winding cage rotor variable speed induction generator with DC link power delivery, energy conversion congress and exposition (ECCE).IEEE, pp.271-278, 2014.
- [23] H. Amimeur, "Contribution au Contrôle de la Machine Asynchrone Double Etoile", Thèse de doctorat en science de l'Université de Batna, 2012.

Bibliographie

- [24] S. Chekkal, D. Aouzellag, K.Ghedamsi, H. Amimeur “ New control strategy of wind generato based on the dual-stator induction generator, ” 10th International Conference on Environmental and Electrical Engineering EEEIC’11, c 2011 IEEE, pp .268-271, Rome, Italy, 2011.
- [25] H. Ney, Equipements de puissance, Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [26] G. Grellet, G. Clerc, Actionneurs électriques, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [27] M. Hamadache, N. Ouaret, "Commande d'un système de pompage photovoltaïque", mémoire d'ingénieur, université de Béjaia, 2007.
- [28] G.K. Singh, K. Nam, S.K. Lim, "A simple indirect field –oriented control scheme for multiphase induction machine", IEEEET Transactions Industrial Electronic, vol.52, No.4, pp.1177–1184, August 2005.
- [29] E. Merabet, A. Belayali, « Commande par la logique floue d'une machine asynchrone double stator », Mémoire d'Ingénieur de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila, Algérie, Juin 2005.