



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université A. MIRA de Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

### **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

**Option : Machines Electriques**

### **Thème**

## **ETUDE ET CONTROLE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE CONNECTEE AU RESEAU ELECTRIQUE**

#### **Encadré par :**

M<sup>me</sup> Samira CHEKKAL

M<sup>r</sup> Lyes KHALDI

#### **Présenté par :**

M<sup>r</sup> Loucif ZADI

#### **Membres du jury :**

M<sup>r</sup> : K.GHEDDAMSI

M<sup>r</sup> : R.BABOURI

Promotion Juin 2019

## Remerciements

### Remerciements

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

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

*Je tiens à exprimer mes remerciements et sincère reconnaissance à mes deux promoteurs : M<sup>me</sup> S. CHEKKAL et M<sup>r</sup> Lyes KHALDI d'avoir accepté de parrainer ce travail, ainsi que pour leur soutien scientifique et moral.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à l'ensemble d'ami(e)s pour leur collaboration et leurs sympathies, à leur tête, M<sup>r</sup> Lyes KHALDI, ACHAT Nafaa, MOURI Massinissa et Lydia, Akli RAHMOUNI, Said NAILI, Takfa SAADI, Moumouh OULEBSSIR et la famille CHABOUNI de m'avoir aidé et soutenu afin que je puisse réaliser mon projet d'études.*

*Je ne pourrai omettre de faire preuve de ma gratitude à mes chers parents, je n'aurai pas pu en arriver là sans leur précieuse présence.*

*Enfin, sans oublier, je remercie les membres du jury qui me feront l'honneur de juger ce modeste travail*

**Merci**

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes Chers Parents.

Mes Frères et Sœurs et Leurs Familles.

À Ma Bien Aimée Manel.

À Ma Deuxième Famille A.A.I À L'occasion De Le 30<sup>ème</sup>

Anniversaire De Sa Création

À Tous Les Défunts De La Cause Démocratique.

À Tous Mes Cousins et Proches

Moumouh, Nassim, Allaoua, Fawzi, Syfax, Koukou, mouhand,  
Rabah.

À Tous Mes Amis

Nafaa, Amel, Lyes, Kouicha, Billal, Kafid, Soraya, Salima,  
Sonya, Assalas, Farik, ,Aissa, Damich, Md akli, Anissa,  
Jayeb, Md Saheb, Sloulou, Et autres.

À La Famille Black & White

À Zami Laid et sa Généreuse Femme Salima Et Leurs Filles et  
Fils.

À La Mémoire De Mennad Kaddouche Que Dieu L'accueille  
Dans Son Vaste Paradis

Loucif Zadi.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICACES</b> .....	<b>II</b>
<b>TABLE DE MATIERES</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLE DE FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....	<b>V</b>
<b>NOMENCLATURE</b> .....	<b>VI</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>14</b>
<b>CHAPITRE1</b> .....	<b>16</b>
<b>ETAT DE L'ART SUR LA PRODUCTION DE L'ENEGIE ELECTRIQUE</b> .....	<b>16</b>
1.1 INTRODUCTION .....	16
1.2 PRINCIPAUX PILIERS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE .....	16
1.2.1 Impact de la transition sur la création d'emplois dans le secteur de l'énergie	17
1.3 DIFFERENTES METHODES DE PRODUCTION D'ENERGIES ELECTRIQUES .....	18
1.4 SYSTEMES DE PRODUCTION D'ENERGIES ELECTRIQUES .....	18
1.4.1 Système de conversion de l'énergie éolienne .....	18
1.4.2 Système de conversion de l'énergie solaire.....	19
1.4.3 Systèmes PV hybrides .....	20
1.5 L'UTILISATION DES MACHINES ELECTRIQUES DANS LA PRODUCTION D'ENERGIE .....	24
1.5.1 Aperçu sur l'histoire des machines électriques .....	24
1.5.2 Classification des machines électriques .....	25
1.6 MACHINES ELECTRIQUES MULTI-PHASEES.....	29
1.6.1 Caractéristiques des machines multi-phasées .....	29
1.6.2 Domaine d'applications des machines multi-phasées.....	31
1.7 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MACHINES MULTIPHASEES.....	32
1.7.1 Avantages .....	32
1.7.2 Inconvénients.....	33
1.8 CONCLUSION .....	33
<b>CHAPITRE 2</b> .....	<b>MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE</b>
<b>DOUBLE ETOILE (MASDE)</b> .....	<b>34</b>
2.1 INTRODUCTION .....	34
2.2 DESCRIPTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE .....	35
2.3 MODELE NATUREL DE LA MASDE .....	35
2.3.1 Hypothèses Simplificatrices d'Etude .....	35
2.3.2 Equations de Tensions .....	36
2.3.3 Equations magnétiques.....	37
2.3.4 Couple électromagnétique .....	39
2.3.5 Equation mécanique .....	40

2.3.6	Simulations et interprétations des résultats de la MASDE dans le repère naturel.....	40
2.4	MODELE BIPHASE DE LA MASDE SELON LE SYSTEME D'AXES D,Q.....	44
2.4.1	Transformation de Park.....	44
2.4.2	Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes d,q.....	45
2.4.3	Couple Electromagnétique.....	47
2.4.4	Simulations et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes d,q.....	49
2.5	ALIMENTATION DE LA MASDE PAR ONDULEURS DE TENSION A COMMANDE M.L.I.....	54
2.5.1	Modélisation de l'onduleur.....	54
2.5.2	Commande par modulation sinus-triangle.....	55
2.5.3	Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	56
2.5.4	Simulation et interprétation des résultats.....	57
2.6	CONCLUSION.....	61
<b>CHAPITRE 3</b>		
<b>CONTROLE DE LA GENERATRICE CONNECTE</b>		
<b>AU RESEAU ELECTRIQUE.....</b>		<b>62</b>
3.1	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>62</b>
3.2	PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE.....	62
3.3	CHOIX D'ORIENTATION DU FLUX.....	63
3.4	DIFFERENTES METHODES DE LA COMMANDE VECTORIELLE.....	63
3.4.1	Méthode de commande directe.....	63
3.4.2	Méthode de commande indirecte.....	64
3.5	COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE SANS REGLAGE DE VITESSE.....	64
3.5.1	Application de la commande indirecte sur la MASDE.....	66
3.6	COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE AVEC REGULATION DE VITESSE.....	67
3.6.1	Identification des paramètres du régulateur de vitesse.....	68
3.6.2	Contrôle de la liaison au réseau.....	70
3.6.3	Simulation et interprétation des résultats.....	73
3.7	CONCLUSION.....	75
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>76</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>79</b>

# TABLE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> - Prévission sur la création d'emplois dans le secteur mondial de l'énergie. ....	17
<b>Figure 1.2</b> - Schéma d'un système de conversion éolien à base de la génératrice asynchrone à cage (GAS).....	19
<b>Figure 1.3</b> - Schéma système PV connecté au réseau.....	20
<b>Figure 1.4</b> - Classification des systèmes hybrides.....	20
<b>Figure 1.5</b> - Schéma synoptique du système hybride. ....	22
<b>Figure 1.6</b> - Schéma présentatif d'un système hybride (PV, Eolien, Diesel). ....	23
<b>Figure 1.7</b> - Moteur à courant continu. ....	26
<b>Figure 1.8</b> - Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.....	27
<b>Figure 1.9</b> - Moteur à aimants en géométries cylindriques.....	27
<b>Figure 1.10</b> - Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	28
<b>Figure 1.11</b> - Machine asynchrone à rotor bobiné.....	29
<b>Figure 1.12</b> - Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.....	32
<b>Figure 1.13</b> - Solution proposée pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie.....	32
<b>Figure 2.1</b> - Représentation schématique des enroulements de la MASDE. ....	35
<b>Figure 2.2</b> - Schémabloc global de simulation de la MASDE en (abc).....	40
<b>Figure 2.3</b> - Allure du couple électromagnétique.....	42
<b>Figure 2.4</b> - Allure du vitesse de rotation. ....	42
<b>Figure 2.5</b> - Allure des courants rotoriques.....	42
<b>Figure 2.6</b> - Allure des courants statoriques de la première étoile. ....	43
<b>Figure 2.7</b> - Allure des courants statoriques de la deuxième étoile. ....	43
<b>Figure 2.8</b> - Allure des courants statoriques. ....	43
<b>Figure 2.9</b> - Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes d,q. ....	45
<b>Figure 2.10</b> - Schéma électrique équivalent.....	45
<b>Figure 2.11</b> - Schéma bloc global de simulation de la MASDE en (d,q).....	49
<b>Figure 2.12</b> - Allure du couple électromagnétique. ....	51
<b>Figure 2.13</b> - Allure de la vitesse de rotation.....	51
<b>Figure 2.14</b> - Allure des courants rotoriques.....	51
<b>Figure 2.15</b> - Allure des ourants statoriques direct et en quadrature de la première étoile. ....	52
<b>Figure 2.16</b> - Allure des courants statoriques direct et en quadrature de la deuxième étoile. ....	52
<b>Figure 2.17</b> - Allure des courants rotoriques direct et en quadrature.....	52

<b>Figure 2.18</b> - Allure des courants statoriques de la première étoile.....	53
<b>Figure 2.19</b> - Allure des Courants statoriques de la deuxième étoile.....	53
<b>Figure 2.20</b> - Zooms du courants statoriques.....	53
<b>Figure 2.21</b> - Schéma d'onduleur triphasé.....	54
<b>Figure 2.22</b> - Schéma MASDE-convertisseur de tension à commande MLI.....	56
<b>Figure 2.23</b> - Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par un onduleur M.L.I. .....	57
<b>Figure 2.24</b> - Signal de porteuse et tension de référence.....	58
<b>Figure 2.25</b> - Signal de commande des interrupteurs d'onduleur.....	58
<b>Figure 2.26</b> - Allure de tension de sortie d'onduleur et le courant de la première phase de la première étoile. ....	59
<b>Figure 2.27</b> - Allure de tension de sortie d'onduleur et le zoom de courant de la première phase de la première étoile. ....	59
<b>Figure 2.28</b> - Allure du couple électromagnétique. ....	59
<b>Figure 2.29</b> - Allure de la vitesse de rotation.....	60
<b>Figure 2.30</b> - Allure des courants rotoriques.....	60
<b>Figure 2.31</b> - Allure des courants statoriques de la première étoile. ....	60
<b>Figure 2.32</b> - Allure des courants statoriques de la deuxième étoile. ....	61
<b>Figure 3.1</b> - Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC).....	64
<b>Figure 3.2</b> - Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE. ....	66
<b>Figure 3.3</b> - Schéma de principe du défluxage.....	67
<b>Figure 3.4</b> - Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse.....	67
<b>Figure 3.5</b> - Boucle de régulation de vitesse.....	68
<b>Figure 3.6</b> - Schéma bloc de découplage en tension.....	69
<b>Figure 3.7</b> - Schéma représentatif du filtre connecté au réseau électrique. ....	70
<b>Figure 3.8</b> - Schémas bloc du système étudié. ....	72
<b>Figure 3.9</b> - Allure du couple électromagnétique.....	73
<b>Figure 3.10</b> - Allure de la vitesse de rotation et vitesse de rotation de référence.....	74
<b>Figure 3.11</b> - Allure de tension de sortie d'onduleur et le courant de la première phase de la première étoile avec le zoom du courant.....	74
<b>Figure 3.12</b> - Allure des courants statoriques de la première phase des deux étoiles. ....	74
<b>Figure 3.13</b> - Allure de la puissance active coté réseau électrique.....	75
<b>Figure 3.14</b> - Allure de la puissance réactive coté réseau électrique. ....	75

# TABLE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1</b> - Machines multiphasees dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasees de type 1).....	30
<b>Tableau 1.2</b> - Machines muliphasees dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasees de type 2).....	31
<b>Tableau 3.1</b> - Paramètres de la MASDE.....	78

# NOMENCLATURE

## **C**

$C_p$	Coefficient de puissance.
$C_{p\_max}$	Coefficient de puissance maximale
$C_{em}$	Couple électromagnétique [N.m]
$C_{em}^*$	Couple électromagnétique de référence [N.m]
$C_r$	Couple mécanique de la turbine [N.m]

## **E**

$E$	Tension continue [V]
-----	----------------------

## **F**

$F$	Fréquence de la tension de référence [Hz]
$f_p$	Fréquence de la porteuse [Hz]
$f_s$	Fréquence du réseau [Hz]

## **G**

$G$	Gain du multiplicateur de vitesse
$g$	Glissement de la machine

## **I**

$i_{as1,2}, i_{bs1,2}, i_{cs1,2}$	Courants triphasés statoriques (étoiles 1 et 2) [A]
$i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}$	Courants statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques directes et quadratiques respectivement [A]
$i_{ag}, i_{bg}, i_{cg}$	Courant du côté réseau [A]
$[i_{s1}] [i_{s2}] [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques [A]

## **I**

$J$	Moment d'inertie [kg.m <sup>2</sup> ]
-----	---------------------------------------

## **K**

$k_f$	Coefficient de frottement visqueux [Nms/rd]
$k_i$	Gain intégral
$k_p$	Gain proportionnel

## **L**

$L_m$	Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor [H]
$L_{ms}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique [H]
$L_{mr}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique [H]
$L_{f1}, L_{f2}, L_r$	Inductances de fuites d'une phase de l'étoile(1,2) et du rotor [H]
$L_{sr}$	Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor [H]
$L_{f1} + L_m$	Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 1 [H]
$L_{f2} + L_m$	Inductance propre cyclique d'une phase de l'étoile 2 [H]
$L_r + L_m$	Inductance propre cyclique d'une phase rotorique [H]

## **M**

$m$	Indice de modulation de l'onduleur
-----	------------------------------------

## **N**

$N$	Vitesse de rotation de la machine [tr/mn]
-----	---

## **P**

$P$	Nombre de paires de pôles de la GASDE
$P_s$	Puissances actives statoriques totale des deux étoiles [W]
$P_{mec}$	Puissance mécanique de la GASDE [W]
$P_n$	Puissance nominale de la génératrice [W]
$P_g$	Puissance active côté réseau [W]

## **Q**

$Q_g$	Puissance réactive côté réseau [VAr]
$q_a$	Nombre équivalent de phase statorique

## **R**

$R$	Résistance de la ligne [ $\Omega$ ]
$R_{s1}, R_{s2}, R_r$	Résistances d'une phase statoriques (étoile 1,2) et rotoriques [ $\Omega$ ]
$R_t$	Résistance du filtre [ $\Omega$ ]

## **T**

$t$	Temps [s]
$T_p$	Période de la porteuse [s]

## **U**

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

## **V**

$V_{a,b,cs1,2}$	Tensions triphasées statoriques (étoile 1 et 2) [V]
$V_{a,b,cr}$	Tensions triphasées rotoriques [V]
$V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}, V_{dr}, V_{qr}$	Tensions statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques dans le référentiel de Park (d,q) respectivement [V]
$V_{ag}, V_{bg}, V_{cg}$	Tension côté réseau électrique [V]
$V_{s1}, V_{s2}, V_r$	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques [V]

## **X**

$[X]$	Vecteur d'état
-------	----------------

## **$\Phi$**

$\phi_{a,b,cr}$	Flux triphasés rotoriques [Wb]
$\phi_{a,b,cs1,2}$	Flux triphasés statoriques (étoile 1 et 2) [Wb]
$\phi_{ds1}, \phi_{qs1}$	Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]
$\phi_{ds2}, \phi_{qs2}$	Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]
$\phi_{dr}, \phi_{qr}$	Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d, q) [Wb]
$\phi_n$	Flux nominal [Wb]
$[\phi_r]$	Vecteur flux rotorique [Wb]
$[\phi_{s1}], [\phi_{s2}], [\phi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques [Wb]

**$\theta$** 

$\theta$	Position de l'axe $u$ par rapport à l'étoile 1 [rd]
$\theta_{gl}$	Position de l'axe $u$ par rapport au rotor [rd]
$\theta_r$	Position du rotor par rapport à l'étoile 1 [rd]
$\theta_{r-a}$	Position du rotor par rapport à l'étoile 2 [rd]

 **$\eta$** 

$\eta$	Rendement de l'ensemble machine-convertisseurs statique
--------	---

 **$\Omega$** 

$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique de la génératrice [rad/s]
$\Omega^*_{mec}$	Vitesse mécanique de référence [rad/s]
$\Omega_n$	Vitesse mécanique nominale de la machine [rad/s]

 **$\omega$** 

$\omega_{gl}$	Pulsation électrique fondamentale du glissement [rd/s]
$\omega_r$	Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotorique [rd/s]
$\omega_s$	Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statorique et du réseau [rd/s]

 **$\alpha$** 

$\alpha$	Angle électrique de décalage entre les deux étoiles [°]
----------	---

# Abréviations

FOC	Field Oriented Control (Commande à flux orienté)
GAS	Génératrice Asynchrone à Cage
GASDE	Génératrice Asynchrone Double Etoile
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
MCC	Machine à Courant Continu
M.L.I	Modulation par Largeur d'impulsion

# INTRODUCTION GENERALE

Le contexte énergétique et climatique actuel, le protocole de Kyoto signé le 11 décembre 1997, la pénurie de gisement pour les sources d'énergie fossiles, le danger que constituent l'énergie nucléaire et la consommation sans cesse de l'énergie dans les différents domaines industriels et même dans les habitats domestiques ont stimulé certains pays à exploiter diverses sources d'énergie renouvelables.

La question du développement durable devient aujourd'hui un élément majeur dans certaines prises de décisions politico-économiques de grande envergure, l'accent qui a été mis sur la transition vers les énergies renouvelables commence en effet à porter ses fruits, et à mener vers une nouvelle façon de penser. Même s'il y a encore énormément de travail en ce sens, la récente prise de conscience générale ouvre alors vers un nouveau marché pour le développement des produits plus respectueux à l'environnement. Les nouveaux challenges aujourd'hui sont donc de proposer des solutions de plus en plus propres, qui permettent de garder un maximum des bénéfices acquis, mais avec une vision claire des risques que représente une mauvaise utilisation des ressources naturelles. Inévitablement, le domaine de production d'énergie électrique n'est pas épargné par ces nouveaux défis qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité.

Une chaîne de conversion d'énergie exploitant des énergies primaires renouvelables est constituée principalement de trois parties. La première partie constitue la source d'énergie primaire et les turbines (éolienne, hydrolienne ...). La deuxième partie correspond à l'ensemble « machine – convertisseur ». Enfin, la dernière correspond à la connexion soit à un réseau de puissance (fonctionnement connecté au réseau électrique) ou à une charge isolée ou autonome. La maîtrise complète de la chaîne de conversion d'énergie fait appel à des compétences pluridisciplinaires, certains travaux vont plus se focaliser sur la partie source d'énergie primaire [CHE15], [DIE14].

D'autres études ont mis l'accent sur l'optimisation énergétique et la commande de l'association turbine – machine – convertisseur [IDJ10], [AMI08], dont l'étude est focalisée sur la partie connexion aux réseaux (actif ou passif) [ABA16] [CHE15].

Au regard de la topologie d'ensemble « machine électrique – convertisseur », l'architecture la plus connue dans les applications de production d'énergie électrique est l'association d'une machine électrique à courant alternatif triphasée à un redresseur MLI triphasé classique. Avec cette architecture classique, la survenance d'un défaut dans son environnement peut avoir un mauvais impact sur la continuité et la fourniture de l'énergie. Afin d'accroître la fiabilité de la topologie de l'ensemble « machine – convertisseur » et de garantir la production d'énergie en mode normal et en mode dégradé dans des conditions optimales, l'augmentation du nombre de phases de la génératrice, en plus de la segmentation de puissance, offre une meilleure qualité du couple et garantit une redondance de la structure nécessaire pour la sûreté de fonctionnement et la continuité de l'énergie en mode dégradé. De ce fait, nous proposons de remplacer la génératrice triphasée classique par une génératrice asynchrone double étoile. Du côté convertisseur d'électronique de puissance, la génératrice double étoile sera associée à deux convertisseurs statiques triphasés chacun d'eux alimente une étoile de la machine asynchrone double étoile.

L'étude et contrôle de la génératrice asynchrone double étoile connectée au réseau fait l'objet de trois chapitres qui structurent ce mémoire.

Il nous apparaît nécessaire de consacrer le premier chapitre à quelques généralités concernant les différentes sources d'énergies renouvelables, quelques systèmes de production d'énergie et les machines multiphasées.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la MASDE et de son alimentation. Après une représentation de la machine et son modèle dans les deux repères ABC et d,q, aussi l'alimentation de la machine par des onduleurs de tension est présentée. Les résultats de simulation obtenus sont affichés et commentés.

Le troisième chapitre présente l'étude et contrôle de la GASDE. Dans ce cadre, un rappel théorique sur la commande est présenté. Par la suite, l'implémentation de la commande vectorielle de commande avec ses différentes étapes est abordée. A travers l'application de cette commande, les résultats de simulation sont exposés et interprétés.

# CHAPITRE 1

## ÉTAT DE L'ART SUR LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

### 1.1 Introduction

Pour produire de l'électricité, il faut transformer une source d'énergie fournie par la nature. Cette opération est réalisée à partir de différents moyens de production, en fonction des quantités produites mais aussi de l'indispensable évolution du mode de production et de consommation énergétique actuel vers des solutions bas carbone, pour lutter contre le changement climatique.

Dans le domaine de la vitesse variable, l'utilisation de la machine asynchrone est due à ses multiples avantages tels que sa robustesse, la simplicité de sa structure, son poids, sa taille mais surtout son peu de maintenance. En raison de la fiabilité et segmentation de puissance, les machines multiphasées sont de plus en plus utilisées dans les applications électriques de forte puissance et les domaines exigeant une excellente continuité de service.

Dans ce chapitre, un aperçu sur les différentes sources d'énergie, quelques systèmes de production d'énergie électrique, une classification générale des machines électriques et une présentation des différentes structures des machines asynchrones multiphasées tout en citant leurs domaines et leurs caractéristiques ainsi leurs avantages et inconvénients qui sera présenté.

### 1.2 Principaux piliers de la transition énergétique

Bien qu'il existe différentes possibilités pour atténuer le changement climatique, les énergies renouvelables avec l'efficacité énergétique sont la meilleure voie pour réussir à réduire une grande partie des émissions à la vitesse requise. L'association de ces deux éléments peut assurer plus de 90 % des réductions nécessaires d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie, à l'aide de technologies sûres, fiables, économiques et largement disponibles. Une feuille de route globale préparée par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA),

estime que la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie finale (CTEF) de nombreux pays peut atteindre au moins 60%.

La Chine par exemple, pourrait accroître la part des énergies renouvelables dans sa consommation d'énergie de 7 % en 2015 à 67 % en 2050. Dans l'Union européenne (UE), cette part pourrait passer d'environ 17 % à plus de 70 %. L'Inde et les États-Unis pourraient voir ces proportions atteindre deux tiers ou plus [IRENA18].

### 1.2.1 Impact de la transition sur la création d'emplois dans le secteur de l'énergie

La transition vers les énergies renouvelables pourrait créer plus d'emplois dans le secteur de l'énergie qu'il n'en supprimerait dans l'industrie des combustibles fossiles.

D'ici 2050, 19 millions de nouveaux emplois seraient créés dans les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique, l'amélioration du réseau et la flexibilité énergétique, soit un gain net de 11,6 millions d'emplois [IRENA18].

La figure (1.1) donne des prévisions sur le nombre d'emplois dans le secteur mondial de l'énergie en 2016, 2030 et 2050 (en million d'emplois).



**Figure 1.1** - Prévision sur la création d'emplois dans le secteur mondial de l'énergie [IRENA18]

## 1.3 Différentes méthodes de production d'énergies électriques

L'électricité est produite de façon décentralisée, directement chez les consommateurs et en petites quantités, par des équipements utilisant des sources d'énergies renouvelables, pour une autoconsommation immédiate.

Pour répondre à la demande en électricité de consommateurs de différentes natures (particuliers, industriels, tertiaires, collectivités) et répartis sur l'ensemble d'un territoire, il faut utiliser des moyens de production industriels permettant de produire de l'électricité en grandes quantités.

Parmi les opérations réalisées, des centrales électriques par la mise en rotation, grâce à la force du vent, de l'eau ou de la vapeur d'eau, d'une turbine qui entraîne un alternateur.

Il existe différents types de centrales suivant l'énergie utilisée :

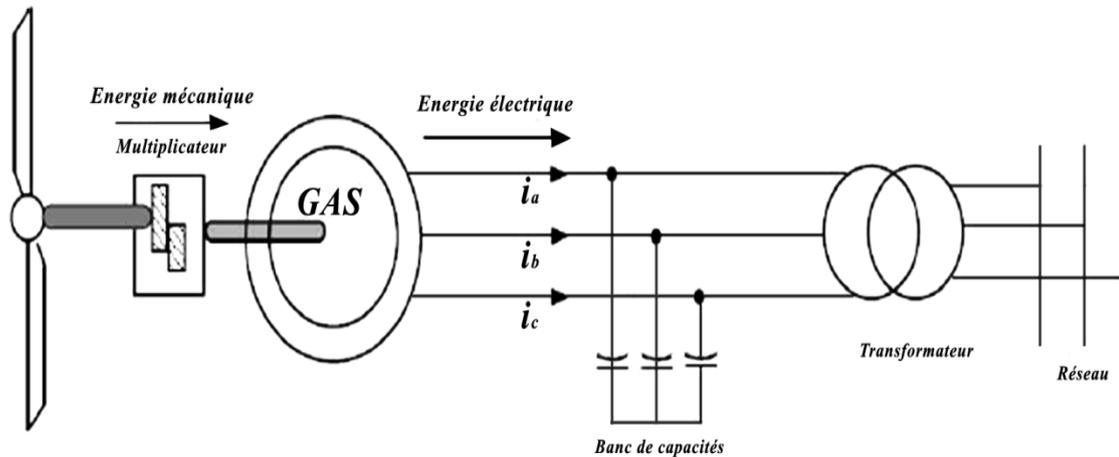
- Nucléaire
- Thermique
- Energies renouvelables :
  - L'énergie hydraulique
  - Les énergies marines
  - L'énergie éolienne
  - L'énergie solaire
  - L'énergie de la biomasse

## 1.4 Systèmes de production d'énergies électriques

### 1.4.1 Système de conversion de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois. C'est le résultat de la transformation du vent en énergie électrique comme le montre la figure (I. 2) qui représente l'exemple d'un système de conversion éolien : la turbine est couplée à un

générateur électrique qui génère un courant alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien en mode autonome [CHE15].



**Figure 1.2** - Schéma d'un système de conversion éolien à base de la génératrice asynchrone à cage (GAS)

## 1.4.2 Système de conversion de l'énergie solaire

L'histoire du photovoltaïque débute en 1839 lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvre le principe photovoltaïque, l'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien Allemand Heinrich Rudolf Hertz.

L'électricité des systèmes photovoltaïques est produite avec zéro émission de gaz à effet de serre. Les générateurs s'étendent des petits produits de consommation, tels que les systèmes d'alimentation pour les habitats isolés aux équipements industriels et aux centrales électriques solaires.

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre durant une journée est dix fois plus grande que celle consommée.

La structure d'un système photovoltaïque dépend à la fois du caractère aléatoire de l'éclairement solaire, des propriétés du générateur PV et des caractéristiques de la charge. La figure (1.3) montre un exemple d'un système de conversion photovoltaïque.

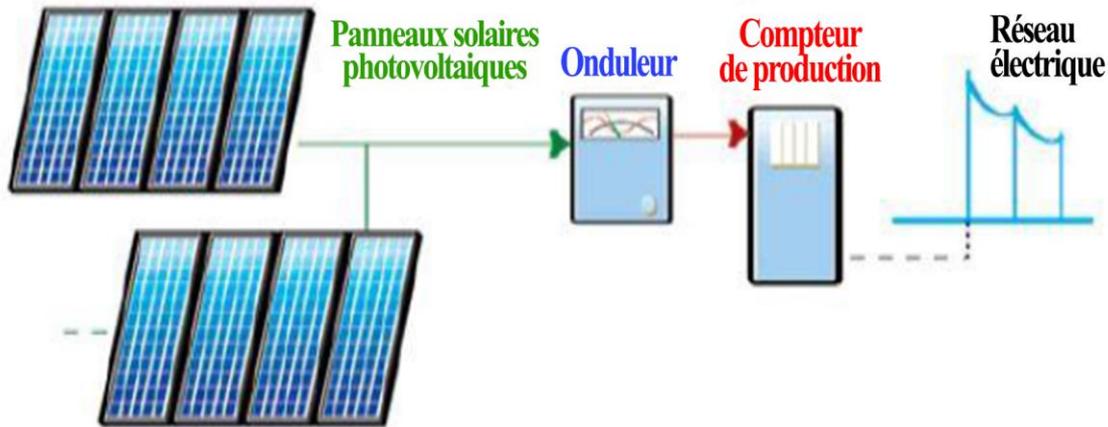


Figure 1.2 – Schéma d'un système PV connecté au réseau

Une installation photovoltaïque reliée au réseau nécessite la mise en place d'une chaîne de transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique basée sur l'effet photovoltaïque.

### 1.4.3 Systèmes PV hybrides

Les systèmes PV hybride sont des systèmes qui reçoivent une partie de leurs énergies d'une ou plusieurs sources supplémentaires qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité. En pratique, ces générateurs photovoltaïques sont combinés à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et/ou fossiles et des moyens de stockage associés.

Au vue de nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles comme la figure (1.4) le montre.

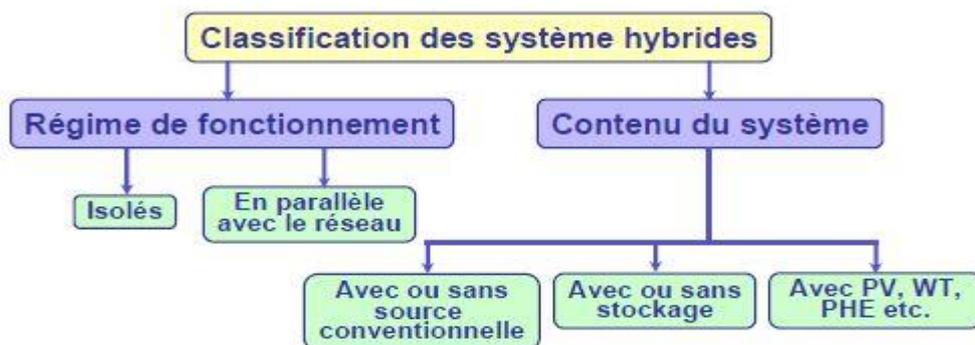


Figure 1.3 - Classification des systèmes hybrides [LUD11]

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome.

#### **1.4.3.1 La structure du système hybride**

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale toute entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

#### **1.4.3.2 Système hybride (éolien – photovoltaïque)**

Le système hybride de production d'énergie, de façon générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système regroupe deux parties pour la production de l'énergie passant par un stockage électrochimique.

Dans ce cas précis de la figure (1.5), on présente un système de petites puissances produisant du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur [BEL06].

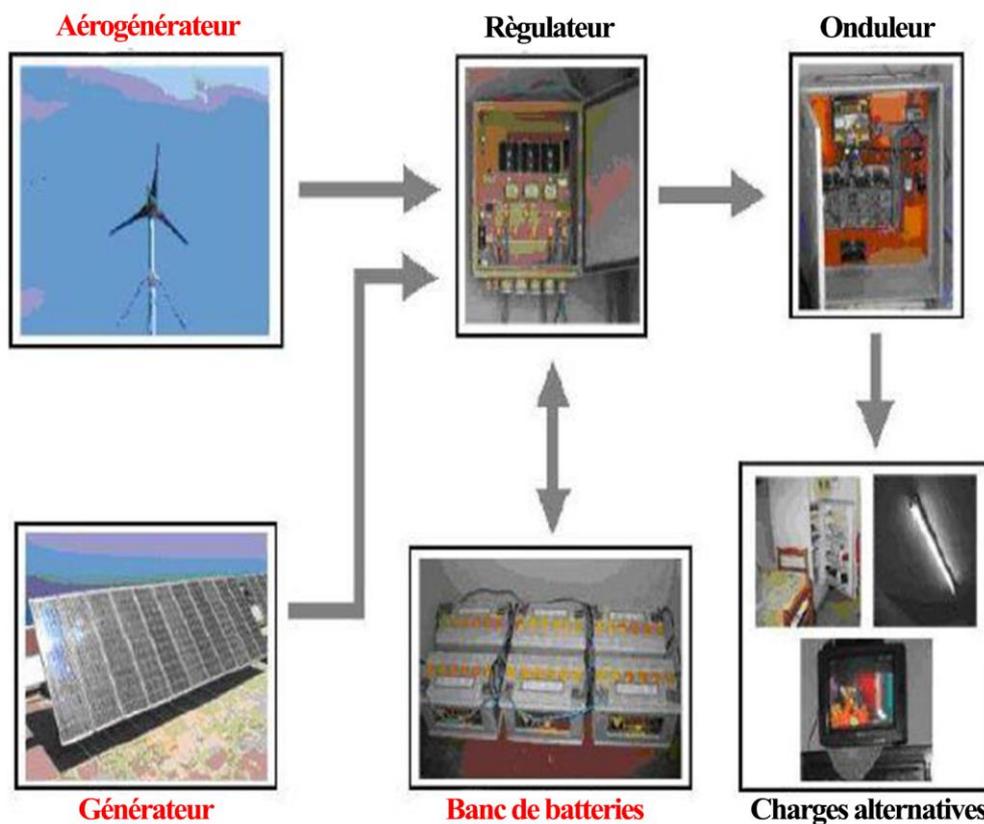


Figure 1.4 - Schéma synoptique du système hybride [BEL06]

### 1.4.3.3 Système hybride (éolien – photovoltaïque – groupe électrogène)

Le système hybride présenté dans la figure (1.6) est supposé alimenter une charge à usage domestique. Le dimensionnement d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La puissance demandée par un foyer de nature donnée n'est pas figée le long de l'année. L'heure de sollicitation maximale du système énergétique par la charge varie en fonction des saisons conséquence à la variation de la durée du jour.

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacité.

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes, le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances.

Minimiser le coût du stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éolien et photovoltaïque [BEL02].

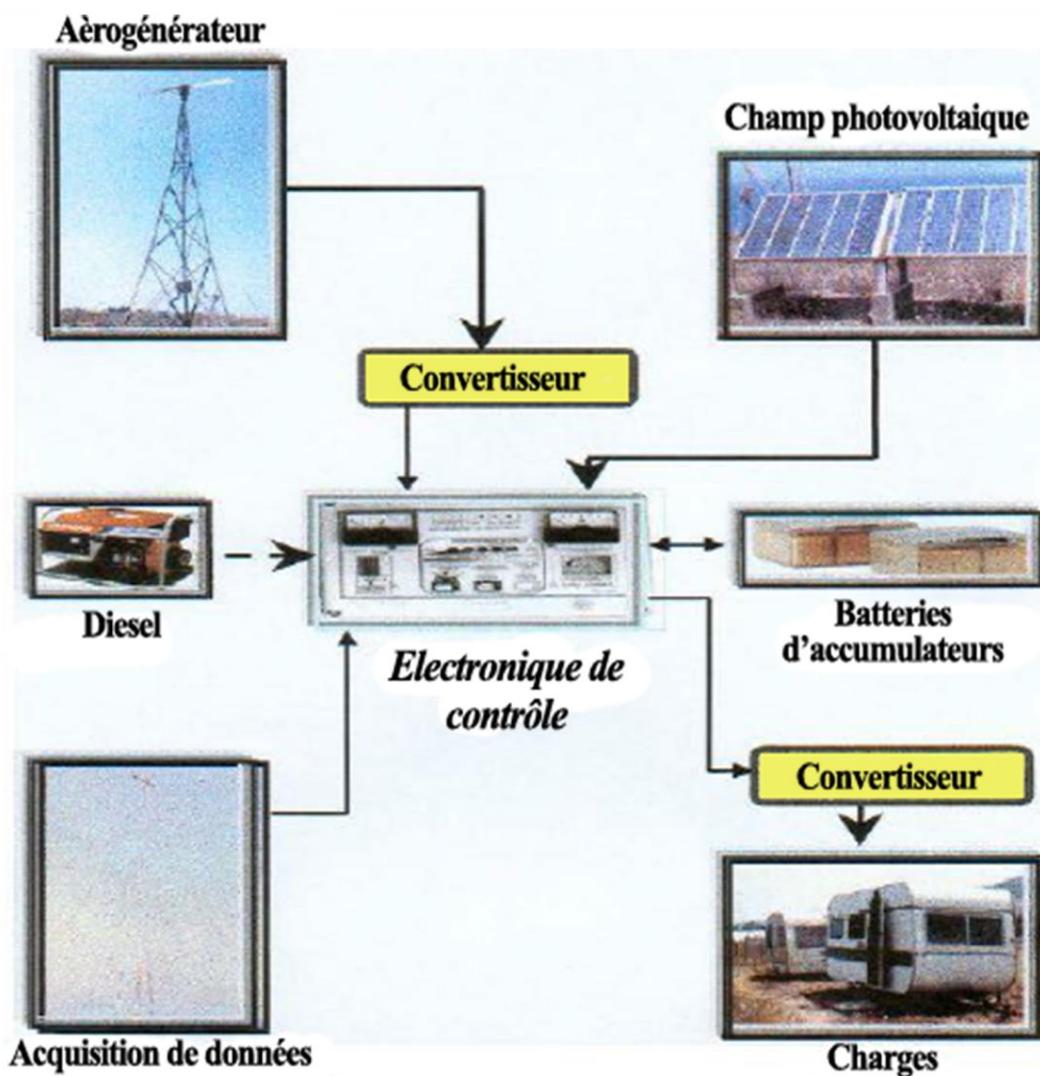


Figure 1.6 - Schéma présentatif d'un système hybride (PV, Eolien, Diesel)

## 1.5 L'utilisation des machines électriques dans la production d'énergie

### 1.5.1 Aperçu sur l'histoire des machines électriques

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Orsted, le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil. En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique. Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque. On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864. En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme. En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme, réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances [\[site01\]](#).

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. La première machine asynchrone triphasée fut réalisée par l'allemand Michael Doliv-Dorowolski en 1889, 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 exigeante en terme d'entretien, présente un taux de défaillance très peu élevé, fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances, conserve presque sans modifications ses parties constitutives essentielles et elle a aussi l'avantage d'être standardisée [AMI08].

## 1.5.2 Classification des machines électriques

### 1.5.2.1 Machines à courant continu

La machine à courant continu (MCC) représentée dans la figure (1.7) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle de l'énergie. Suivant la méthode de création du champ magnétique. On distingue l'excitation électromagnétique et magnétoélectrique. Si la première est créée à l'aide de bobines, la seconde est réalisée à l'aide d'aimants permanents. L'excitation électromagnétique est la plus répandue. Elle peut être obtenue à l'aide d'une source d'alimentation indépendante, ou bien à travers l'induit (auto excitation). Selon le mode de connexion de l'enroulement d'excitation par rapport à l'induit qui a une grande influence sur les propriétés de la machine, on distingue les excitations indépendantes, shunt, série et composée.

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

Même si elles sont de moins en moins utilisées dans le domaine de l'industrie, leur emploi comme moteur reste sans équivalent dans le domaine des faibles vitesses ; les équipements domestiques, automobiles (essuie-glace, ventilateurs, démarreur).

Pour pallier aux inconvénients du collecteur, et grâce à l'apparition de nouveaux matériaux, plus précisément, d'aimants performants à base de terres rares, on remarque, actuellement, l'utilisation de nouvelles machines à courant continu sans collecteur dont la puissance ne cesse de croître.

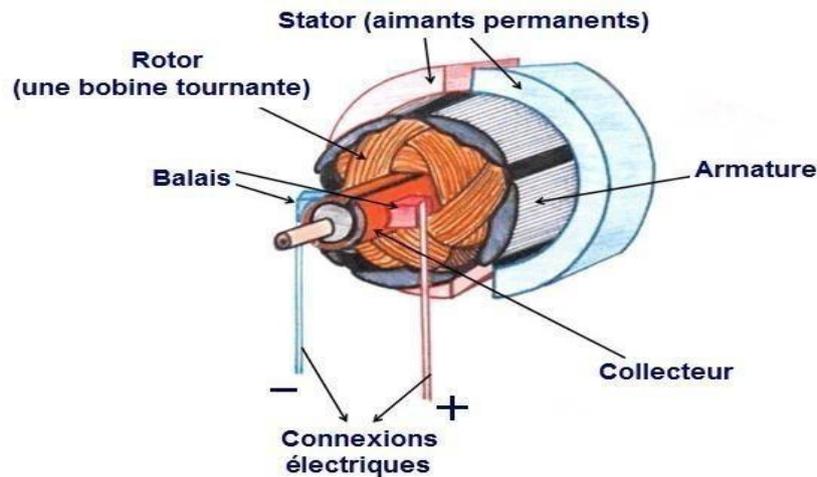


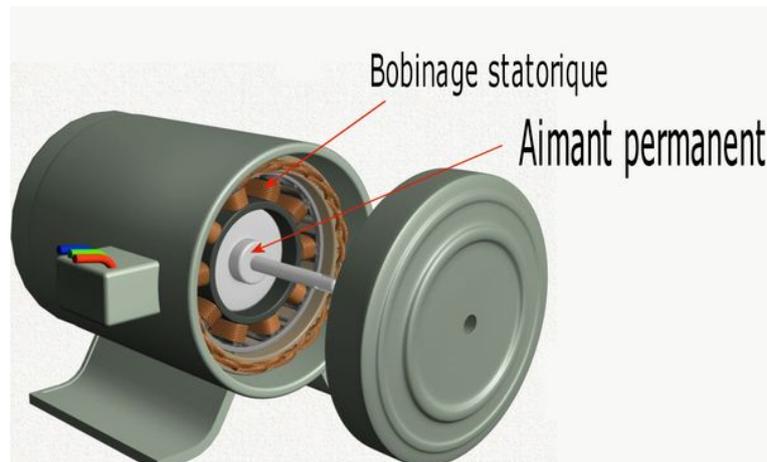
Figure 1.5 - Moteur à courant continu [ACH18]

### 1.5.2.2 Machines synchrones

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

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

Avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé). La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance [Site02].



**Figure 1.8** - Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent

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

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer [ACH18].



**Figure 1.6** - Moteur à aimants en géométries cylindriques

### 1.5.2.3 Machines asynchrones

#### 1.5.2.3.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil

On distingue deux types de machines asynchrones selon que les enroulements rotoriques sont bobinés ou à cage d'écureuil. Les avantages des machines à cage d'écureuil résident dans

leur simplicité de construction, de manœuvre et d'entretien, leur robustesse mécanique et leur faible prix de revient [ACH18]. La machine asynchrone est très couramment utilisée dans une gamme de puissances allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts

Il est caractérisé par un fonctionnement stable, une vitesse pratiquement constante et un rendement élevé autour de la charge nominale.

La figure (1.10) montre un exemple d'une machine asynchrone à cage d'écureuil :

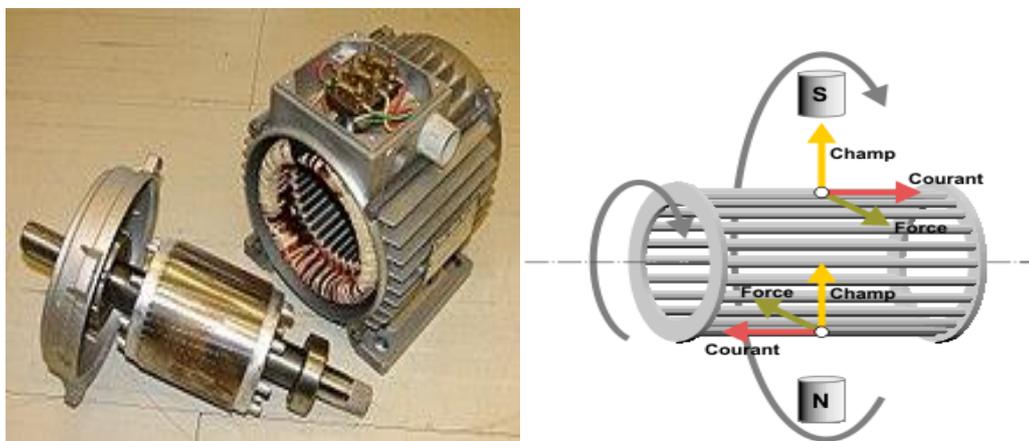


Figure 1.7 - Machine asynchrone à cage d'écureuil

### 1.5.2.3.2 Machines asynchrones à rotor bobiné

Le rotor est formé d'enroulements polyphasés répartis sur un cylindre ferromagnétique. Ces enroulements constituent une succession de  $2p$  pôles comme ceux du stator [ACH18].

Dans tous les cas, les enroulements ainsi constitués sont fermés sur eux-mêmes. (Rotor en court-circuit). Admettons que le rotor tourne. La vitesse angulaire ( $\omega$ ) du rotor est nécessairement différente de la vitesse du champ tournant qu'il voit donc défiler. En effet : s'il y a rotation c'est qu'il s'est développé un couple, ce dernier résulte de l'interaction des champs statorique et champ rotorique. Or le champ rotorique est induit, c'est à dire qu'il résulte de la génération de courants polyphasés induits par le stator dans le rotor. Cela signifie que chaque enroulement rotorique est le siège d'une f.e.m. induite donc d'une variation de flux, ceci n'est possible que dans la mesure où la vitesse du champ tournant (inducteur) se déplace à une autre vitesse que celle de l'enroulement (induit) rotorique.

La figure (1.11) présente les différentes parties de la machine asynchrone à rotor bobiné :

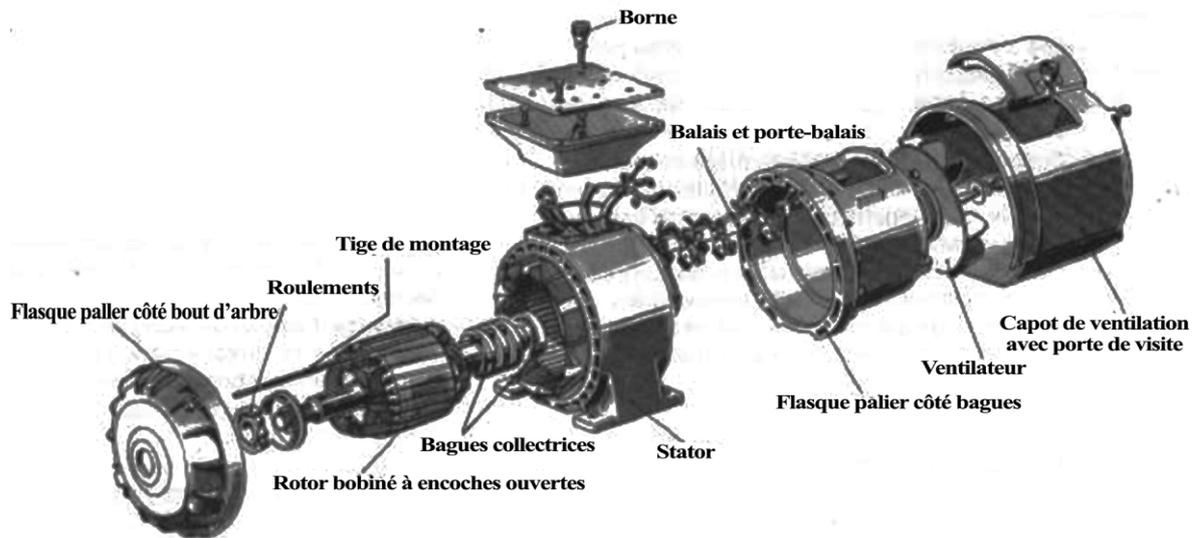


Figure 1.8 - Machine asynchrone à rotor bobiné

## 1.6 Machines électriques multi-phasées

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage et ceux des machines multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées. [HAD01], [AMI08].

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

### 1.6.1 Caractéristiques des machines multi-phasées

Il existe habituellement deux types de machines multiphasées, les machines multiphasées de type (1), et du type (2), suivant que le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois

### 1.6.1.1 Machines multi-phasées de type (1)

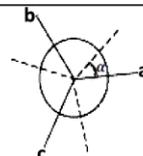
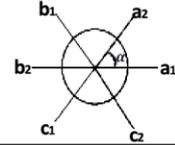
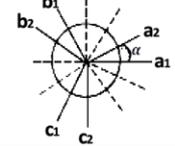
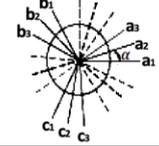
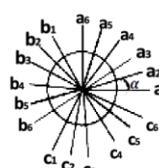
Les machines multi-phasées de « type 1 » sont des machines, dont le nombre de phases statoriques ( $q$ ) est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en ( $\eta$ )étoiles triphasées ( $q= 3\eta$ ) tel que ( $\eta= 1,2,3,4\dots$ ), ces machines sont aussi appelées « machines multi-étoiles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

Il peut y avoir plusieurs configurations possibles suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes (ceci correspondant au décalage entre étoiles).

En effet, une machine double étoile ( $q= 6$ ) dont les étoiles sont décalées de ( $\alpha = \pi/6$ ) a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de ( $\alpha=\pi/3$ ).

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un « nombre équivalent de phases », note ( $q_\alpha$ ), dont la définition est ( $q_\alpha = \pi/\alpha$ ).

**Tableau 1.1** - Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasées de type 1) [IFF16]

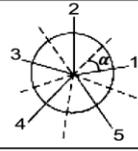
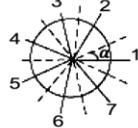
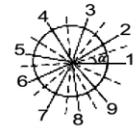
Nombre de phases ( $q$ )	Nombre équivalent de phases ( $q_\alpha$ )	Décalage angulaire ( $\alpha$ )	Représentation schématique, position des bobines
3	3	$\pi/3$	
6	3	$\pi/3$	
6	6	$\pi/6$	
9	9	$\pi/9$	
18	9	$\pi/9$	

### 1.6.1.2 Machines multi-phasées de type (2)

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

Le tableau (1.2) présente quelques exemples de machines multiphasées de type (2)

**Tableau 1.2** - Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasées de type 2) [IFF16]

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

### 1.6.2 Domaine d'applications des machines multi-phasées

Les machines multi-phasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment, etc.

- Une application (figure (1.12)) concerne l'utilisation des machines multiphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne : la machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux [LAK14].

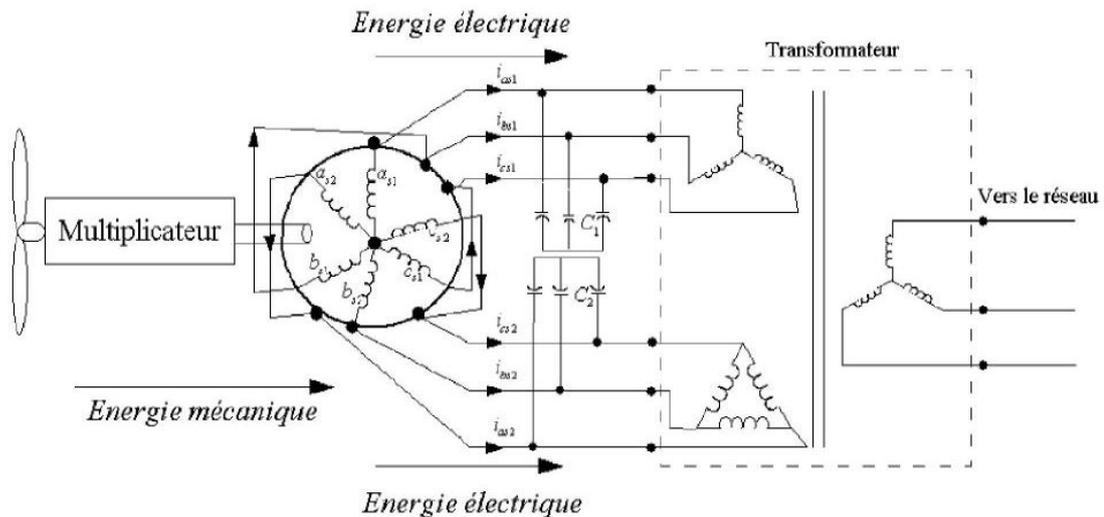


Figure 1.9 - Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases

• En 2014, les auteurs dans [TUT14], ont présenté un type de la MASDE fonctionnant en mode générateur montré dans la figure (1.13). Le principal avantage de la GASDE est l'amélioration de sa capacité à fonctionner à des petites vitesses variables pour les éoliennes ou les hydroliennes [CHE15].

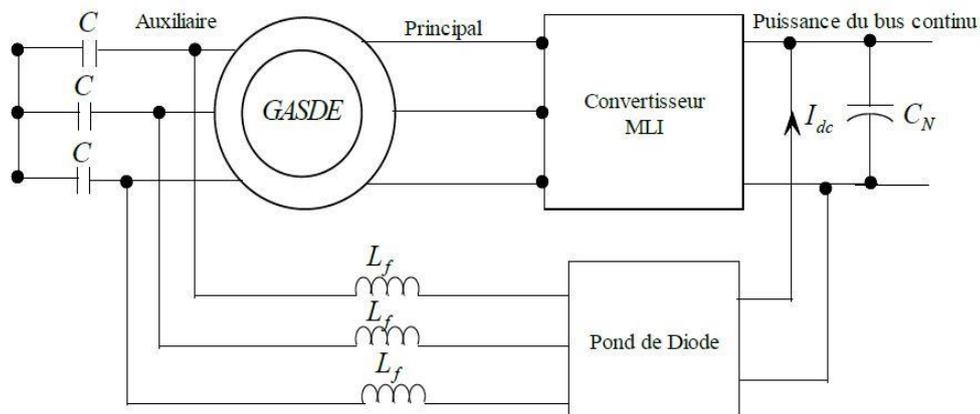


Figure 1.10 - Solution proposée pour des éoliennes à vitesse variable ou hydro système de conversion d'énergie

## 1.7 Avantages et inconvénients des machines multi-phasées

### 1.7.1 Avantages

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

- Améliorer la fiabilité en offrant la possibilité de fonctionner en régimes dégradés (une ou plusieurs phases ouvertes).
- Elargir les possibilités de commande par commutation de la vitesse synchrone, en changeant la séquence des tensions appliquées à la machine.
- Diminuer le contenu harmonique du courant du bus continu lors d'une alimentation par onduleurs [YAH11].

### 1.7.2 Inconvénients

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

- Le coût : le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine.
- L'apparition des courants harmonique de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.
- Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée pour les convertisseurs statiques spécifiés et adapté pour les machines multiphasées de type (2), puisque les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à Multiphasées de type (2) [YAH11], [MEC13].

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude de manière générale sur les différentes sources d'énergies ainsi, l'approche vers quelques systèmes de conversions d'énergies suivi par un état de l'art sur les machines électriques en général et sur les machines électriques multiphasées et leurs applications dans les différentes configurations de conversion de l'énergie, basées sur les différents générateurs électriques ont été présentés.

Etant donné des études récentes sur la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) et vu ses avantages, il est très intéressant de pouvoir étudier cette dernière qui sera l'un des objectifs du chapitre suivant où on effectuera la modélisation des différentes parties du système étudié.

# CHAPITRE 2

## MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE

### 2.1 Introduction

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

La description et la modélisation de la MASDE dans le repère naturel(abc), où cette dernière est basée sur la non application de la matrice de Park, cela signifie que les variables qui définissent l'état électromagnétique des enroulements de la machine restent sous forme naturels, nous passerons vers la modélisation de (MASDE) dans le repère (d,q) où cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature), nous étudierons dans un premier temps la MASDE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées (réseau électrique), nous passerons ensuite à l'alimentation de cette dernière par onduleurs de tension à commande M.L.I.

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

## 2.2 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. La figure (2.1) représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles ( $\theta_{r1}$ ) et ( $\theta_{r1} - \alpha$ ) représentent respectivement la position du rotor (phase  $A_r$ ) par rapport à l'étoile 1 (phase  $A_{s1}$ ) et à l'étoile 2 (phase  $A_{s2}$ ). Les grandeurs relatives aux deux étoiles (1 et 2) seront notées respectivement par les indices 1 et 2.

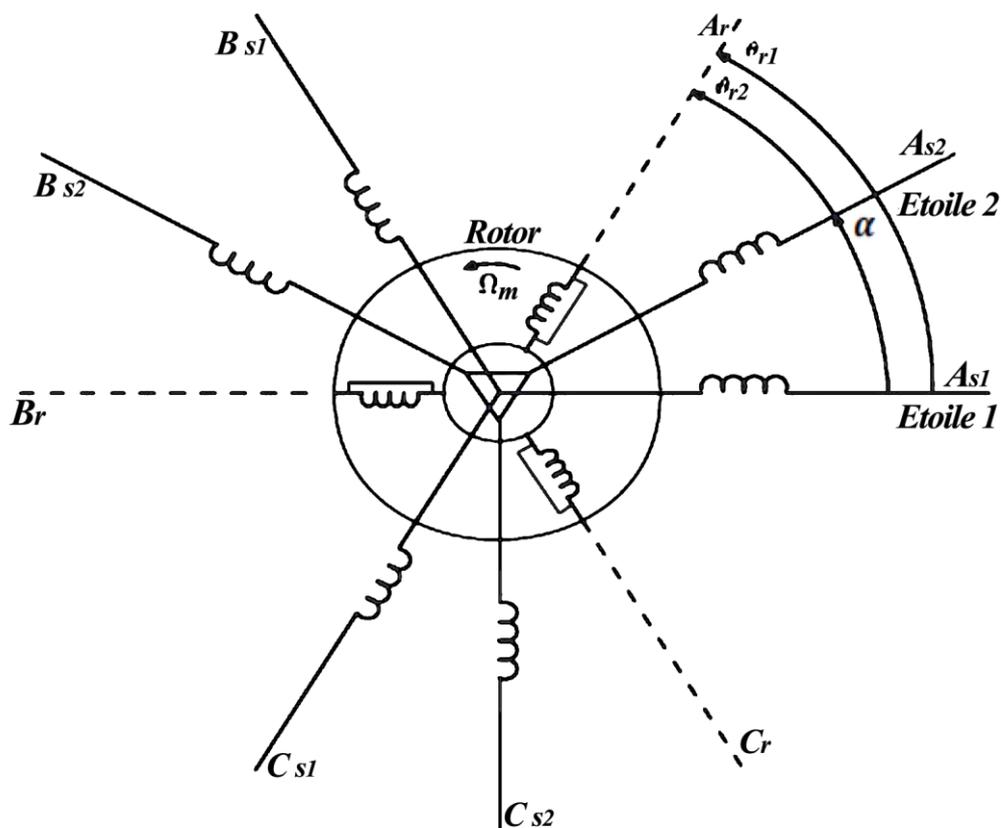


Figure 2.1 - Représentation schématique des enroulements de la MASDE [MER13]

## 2.3 Modèle Naturel de la MASDE

### 2.3.1 Hypothèses Simplificatrices d'Etude

Pour écrire les équations traduisant le fonctionnement de la MASDE dans le repère naturel, en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes [Had01] :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants et on néglige l'effet d'hystérésis ;
- La construction de la machine est supposée homogène c'est-à-dire ; la longueur de l'entrefer est constante ;
- Nous admettons de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la variation de température ;
- On admettra que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques.

L'écriture des équations des tensions des phases des deux enroulements du stator et du rotor sont données comme suit :

### 2.3.2 Equations de Tensions

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

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

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

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

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

Où :

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

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

### 2.3.3 Equations magnétiques

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

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

Où, les matrices des inductances sont exprimées comme suit :

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

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

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

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

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

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

Avec :

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

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

D'après les équations des tensions des deux étoiles et du rotor représentées dans (2.1) et en remplaçant les équations magnétiques (2.6) dans (2.1), on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt}[L_{11}][i_{s1}] + \frac{d}{dt}([L_{12}][i_{s2}] + [L_{1r}][i_r]) \\ [v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt}[L_{22}][i_{s2}] + \frac{d}{dt}([L_{12}]^t[i_{s1}] + [L_{2r}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[L_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_{1r}]^t[i_{s1}] + [L_{2r}]^t[i_{s2}]) \end{array} \right\} \quad (2.13)$$

Comme les inductances statoriques des deux étoiles et rotoriques ne dépend pas du temps mais de théta ( $\theta$ ), on établit un changement de variable, d'où l'équation (2.13) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + [L_{11}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] + [L_{12}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{1r}][i_r] + [L_{1r}] \frac{d}{dt}[i_r] \\ [v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + [L_{22}] \frac{d}{dt}[i_{s2}] + [L_{21}] \frac{d}{dt}[i_{s1}] \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{2r}][i_r] + \frac{d}{dt}[L_{2r}][i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [L_r] \frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta_r} [L_{1r}]^t[i_{s1}] + \frac{d}{dt} \frac{d\theta_r}{d\theta_r} [L_{2r}]^t[i_{s2}] \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}([I_{s1}]) = [L_{11}]^{-1}([V_{s1}] - [R_{s1}][I_{s1}] - [L_{12}] \frac{d}{dt}([I_{s2}]) - [L_{1r}] \frac{d}{dt}([I_r]) \\ \quad - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([L_{1r}])[I_r]) \\ \frac{d}{dt}([I_{s2}]) = [L_{22}]^{-1}([V_{s2}] - [R_{s2}][I_{s2}] - [L_{21}] \frac{d}{dt}([I_{s1}]) - [L_{2r}] \frac{d}{dt}([I_r]) \\ \quad - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([L_{2r}])[I_r]) \\ \frac{d}{dt}([I_r]) = [L_r]^{-1}([V_r] - [R_r][I_r] - [L_{1r}] \frac{d}{dt}([I_{s1}]) - [L_{2r}] \frac{d}{dt}([I_{s2}]) - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([L_{1r}])[I_{s1}] \\ \quad - \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([L_{2r}])[I_{s2}]) \end{array} \right. \quad (2.15)$$

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

$$\frac{d}{d\theta_r}[L_{1r}] = -L_{sr}\omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\frac{d}{d\theta_r}[L_{2r}] = -L_{sr}\omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) & \sin\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.3.4 Couple électromagnétique

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

$$C_{em} = P/2 \left\{ ([i_{s1}]^t [i_{s2}]^t [i_r]^t) \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{1,1}] & [L_{1,2}] & [L_{1,r}] \\ [L_{2,1}] & [L_{2,2}] & [L_{2,r}] \\ [L_{r,1}] & [L_{r,2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \right\} \quad (2.18)$$

Et comme sauf les matrices d'inductances mutuelles stator/rotor qui dépend de  $(\theta_r)$ , l'équation de couple peut être simplifiée comme suit :

$$C_{em} = P \left\{ [i_{s1}]^t \frac{d}{d\theta_r}[L_{1,r}][i_r] + [i_{s2}]^t \frac{d}{d\theta_r}[L_{2,r}][i_r] \right\} \quad (2.19)$$

### 2.3.5 Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega_r \quad (2.20)$$

$$\text{Avec : } \Omega_r = \frac{W_r}{P} \quad (2.21)$$

$$\text{Et : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.22)$$

### 2.3.6 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le model naturel

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (2.2).

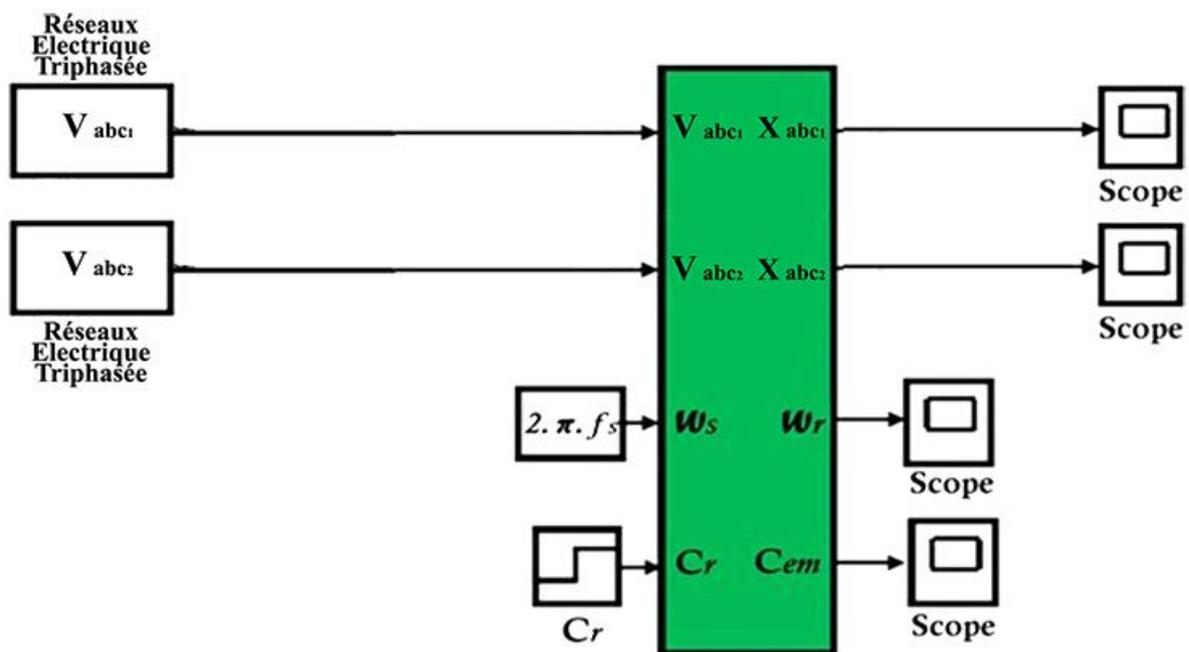


Figure 2.2 - Schéma bloc global de simulation de la MASDE en (abc)

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

Les figures (2.3\_2.8) montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant  $t = 1.7s$  d'une valeur de 15N.m, et on a éliminé la charge à l'instant  $t=2.7s$  puis on a appliqué une autre charge négative a l'instant  $t = 4s$  d'une valeur de -15 N.m.

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

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 2996 tr/min.

Au démarrage, les courants statoriques des étoiles 1 et 2 ( $i_{s1}$  et  $i_{s2}$ ) passent par un régime transitoire dont les valeurs qui atteignent 4 à 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 26.8A pour permettre au couple électromagnétique de vaincre l'inertie de la machine. Puis, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 1.3A. Il est à signaler que les deux étoiles ont les mêmes paramètres.

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

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

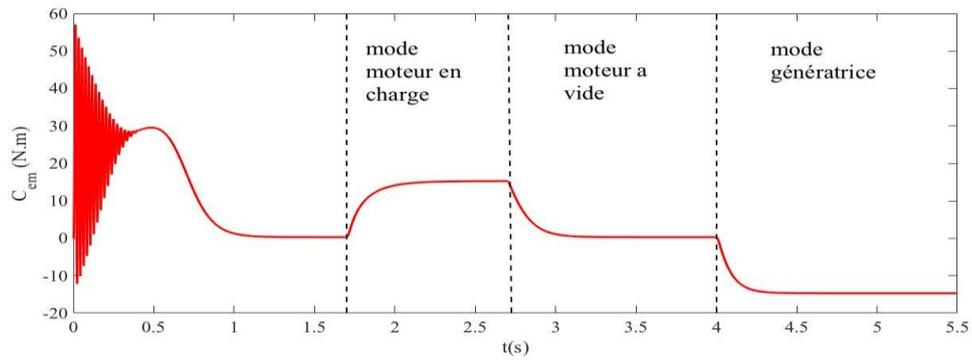


Figure 2.3 - Allure du couple électromagnétique

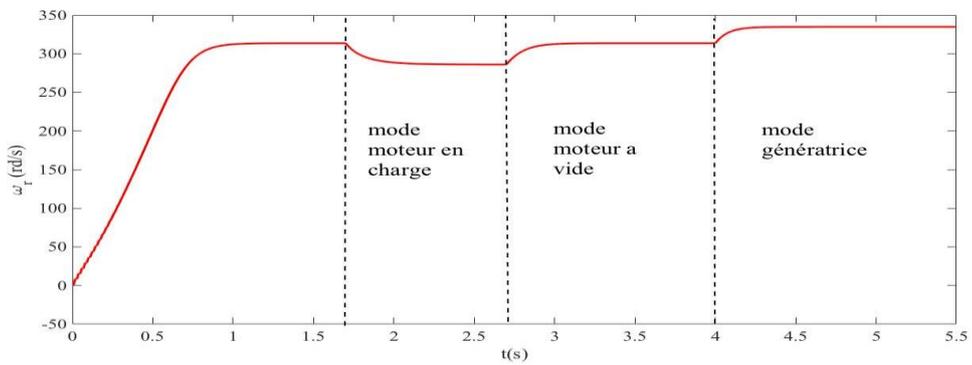


Figure 2.4 - Allure de la vitesse de rotation

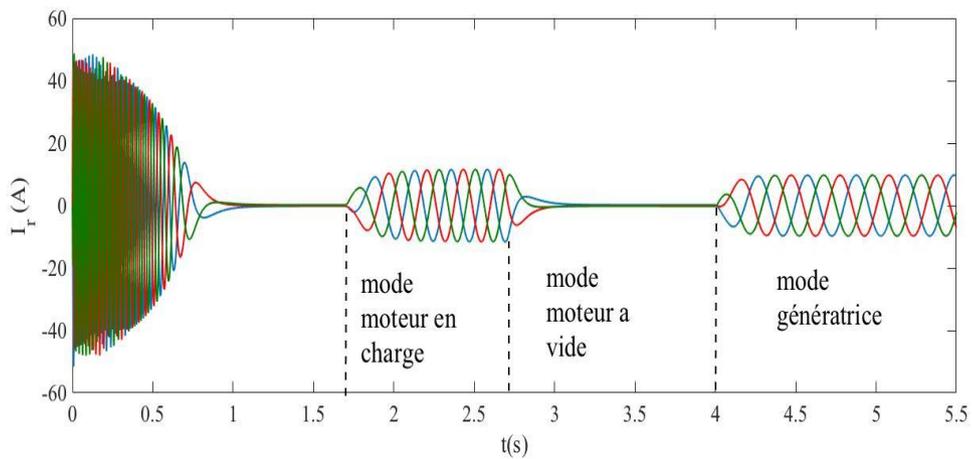


Figure 2.5 - Allure des courants rotoriques

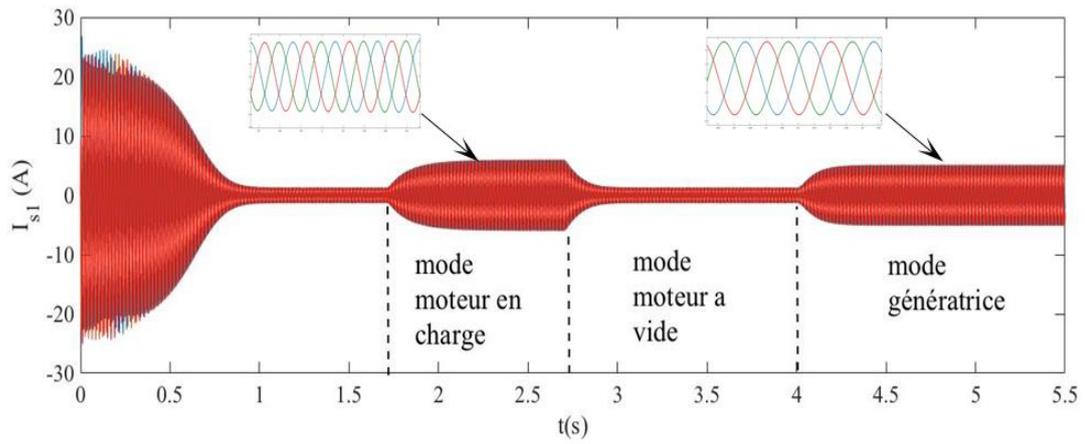


Figure 2.6 - Allure des courants statoriques de la première étoile

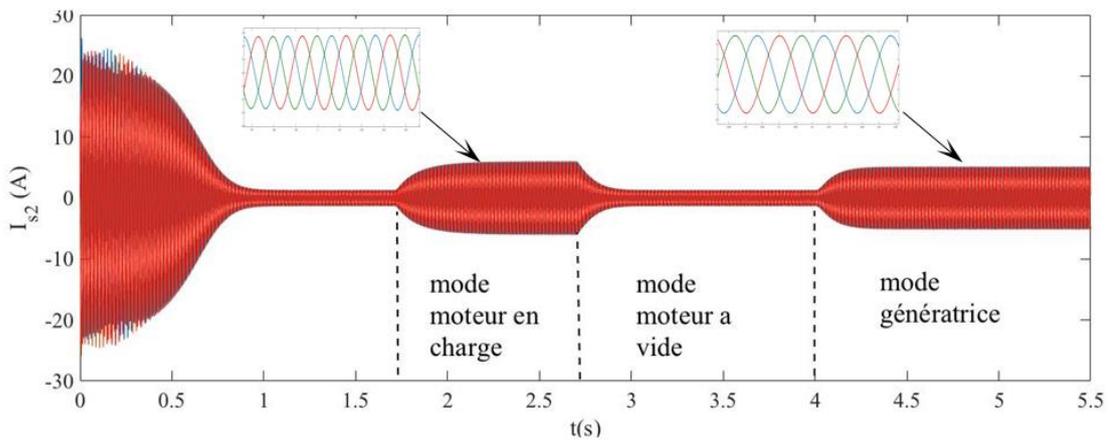


Figure 2.7 - Allure des courants statoriques de la deuxième étoile

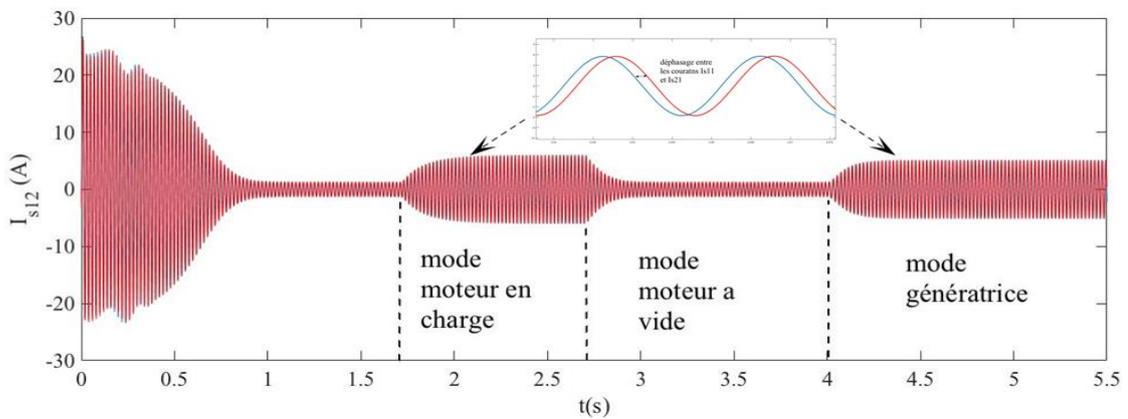


Figure 2.8 - Allure des courants statoriques

## 2.4 Modèle biphasé de la MASDE selon le système d'axes d,q

### 2.4.1 Transformation de Park

La modélisation de la MASDE passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement [AMI08], avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Pour cela, on applique les matrices de passage de Park direct et inverse suivantes :

La matrice de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 :

$$[A_{ps2}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[A_{pr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r + 4\pi/3) & -\sin(\theta - \theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

La matrice inverse de Park pour l'étoile 1 :

$$[A_{ps1}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Avec :

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

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

### 2.4.2 Modèle biphasé de la MASDE lié au système d'axes d,q

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

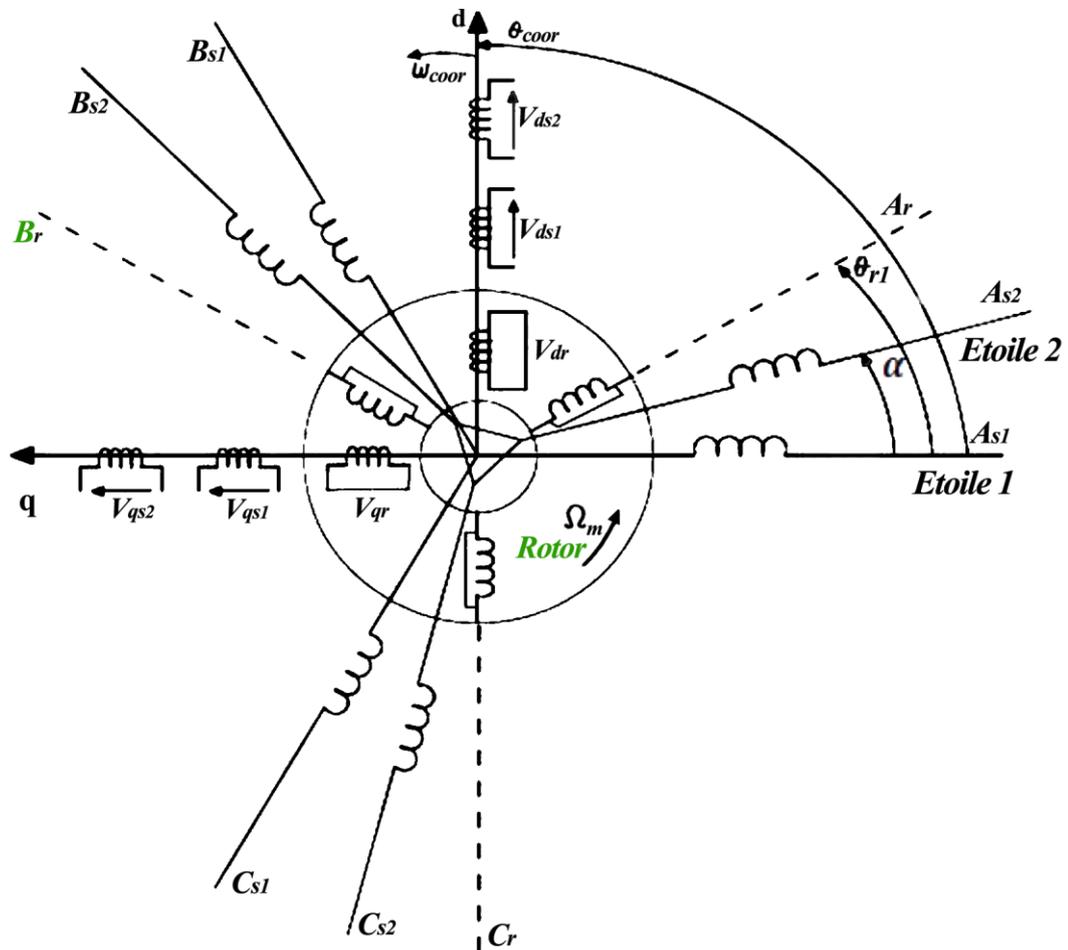


Figure 2.9 Schéma d'enroulements de la MASDE dans les axes d,q [MER13]

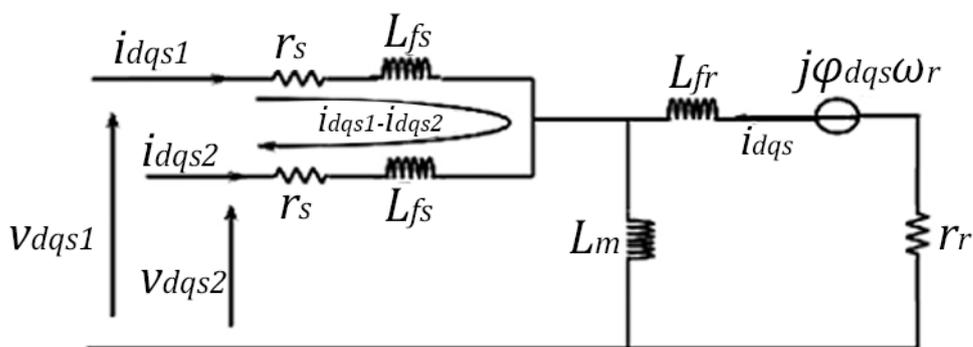


Figure 2.10 - Schéma électrique équivalent

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1} = r_1 I_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ V_{qs1} = r_1 I_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} + \omega_s \Phi_{ds1} \\ V_{ds2} = r_2 I_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_s \Phi_{qs2} \\ V_{qs2} = r_2 I_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} + \omega_s \Phi_{ds2} \\ V_{dr} = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_{gl} \Phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_{gl} \Phi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (2.27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds1} = L_1 I_{ds1} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = L_1 I_{qs1} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_2 I_{ds2} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs2} = L_2 I_{qs2} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_{ms}(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_{ms}(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Avec :

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

En introduisant le système d'équations (2.28) dans (2.27) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$\text{Où : } [B][U] = [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega_{gl} [C][I] + [D][I] \quad (2.29)$$

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

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

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

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

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

En mettant le système (2.13) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt} [I] = [L]^{-1} \{ [B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I] \} \quad (2.30)$$

### 2.4.3 Couple Electromagnétique

Pour trouver l'expression du couple dans le système d'axe (d,q) il est nécessaire de déterminer la puissance absorbée instantanée [MAD04]. La particularité de la transformation de Park est de conserver la puissance absorbée, on peut écrire alors :

$$p_a = v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1} + v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2} \quad (2.31)$$

En remplaçant les tensions ( $v_{d1}$ ,  $v_{q1}$ ,  $v_{d2}$  et  $v_{q2}$ ) par leurs expressions dans (2.31), on trouve:

$$p_a = \left( \begin{array}{l} [R_1 i_{ds1}^2 + R_1 i_{qs1}^2 + R_2 i_{ds2}^2 + R_2 i_{qs2}^2] \\ + \left[ \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right] \\ + \omega_s [\varphi_{ds1} i_{ds1} + \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} + \varphi_{qs2} i_{qs2}] \end{array} \right) \quad (2.32)$$

L'expression (2.32) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- Le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) ;
- Le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ).

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = P \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (2.33)$$

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

$$C_{em} = P(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (2.34)$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{ds1}$ ,  $\varphi_{qs1}$ ,  $\varphi_{ds2}$ ,  $\varphi_{qs2}$ ) donné par (2.28) dans (2.34)

On obtient :

$$C_{em} = PL_m[(i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}] \quad (2.35)$$

A partir des équations des flux rotoriques ( $\phi_{ds2}$  et  $\phi_{qs2}$ ) exprimées par (2.28).

On tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\phi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (2.36)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\phi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (2.37)$$

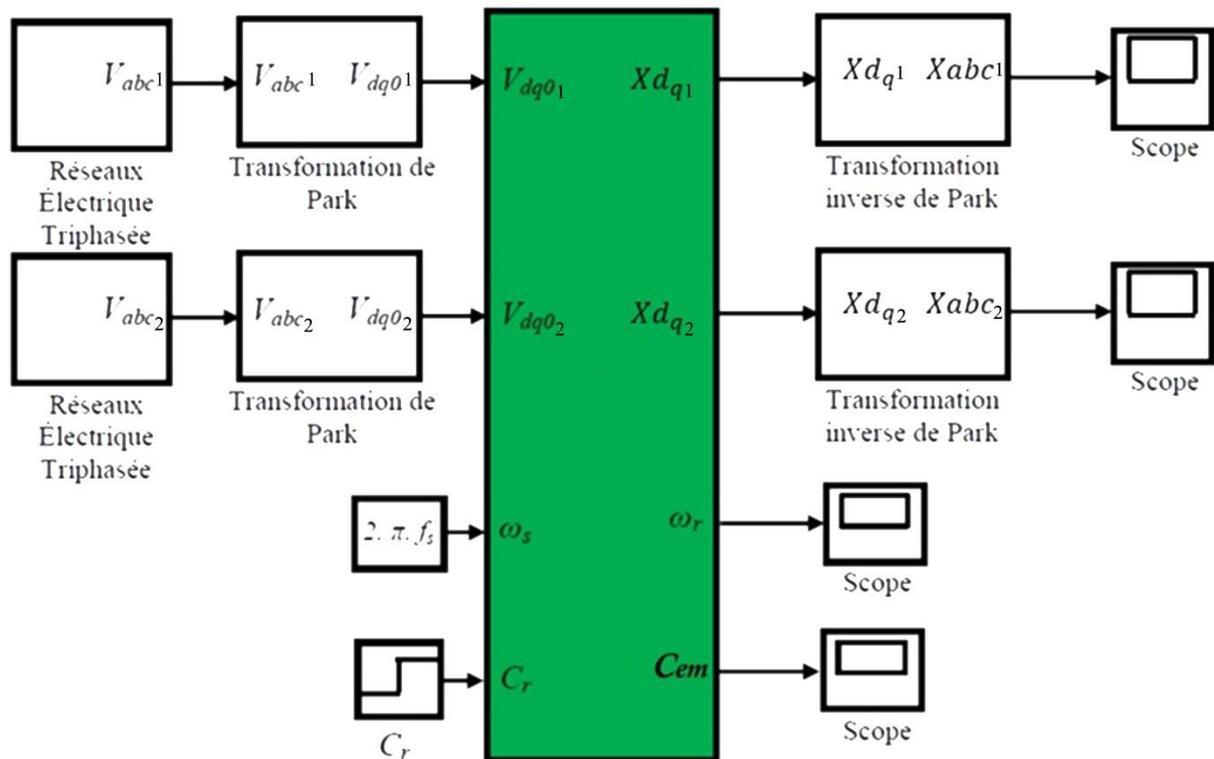
En introduisant (2.36) et (2.37) dans l'équation (2.35), on aura la relation du couple électromagnétique exprimé en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\phi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\phi_{qr}] \quad (2.38)$$

Enfin, pour compléter la relation (2.38), on doit ajouter les équations (2.20) et (2.21). Les équations (2.20), (2.21), (2.28) et (2.36) constituent un modèle électromécanique complet de la MASDE, conformément aux hypothèses simplificatrices d'étude.

## 2.4.4 Simulation et interprétations des résultats de la MASDE dans le système d'axes d,q

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure (2.11).



**Figure 2.11** - Schéma bloc global de simulation de la MASDE en (d,q)

Les figures (2.12\_2.20) montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de la MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tension (220-50Hz) suivi de l'application d'une charge à l'instant  $t = 1.7s$  d'une valeur de 15N.m, et on a éliminé la charge à l'instant  $t=2.7s$  puis on a appliqué une autre charge négative à l'instant  $t = 4s$  d'une valeur de -15N.m.

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

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 2996tr/min.

Au démarrage, les courants statoriques des étoiles 1 et 2 ( $i_{s1}$  et  $i_{s2}$ ) passent par un régime transitoire dont les valeurs qui atteignent 4 à 5 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 26.8A pour permettre au couple électromagnétique de vaincre l'inertie de la machine. Ensuite, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 1.3A. A noter que les deux étoiles ont les mêmes paramètres.

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

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

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

L'application d'une charge à la machine à l'instant  $t = 4s$  provoque une perturbation qui sera compensée par le décroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de -15.52N.m. Le courant du stator augmente et tend vers une valeur de 5.3A. Pour la vitesse, on constate qu'elle augmente jusqu'à 335.5rad/s. À l'instant  $t = 4s$ , le courant statorique direct prend la valeur de -2.84A, alors que le courant en quadrature prend la valeur de 5.8(A).

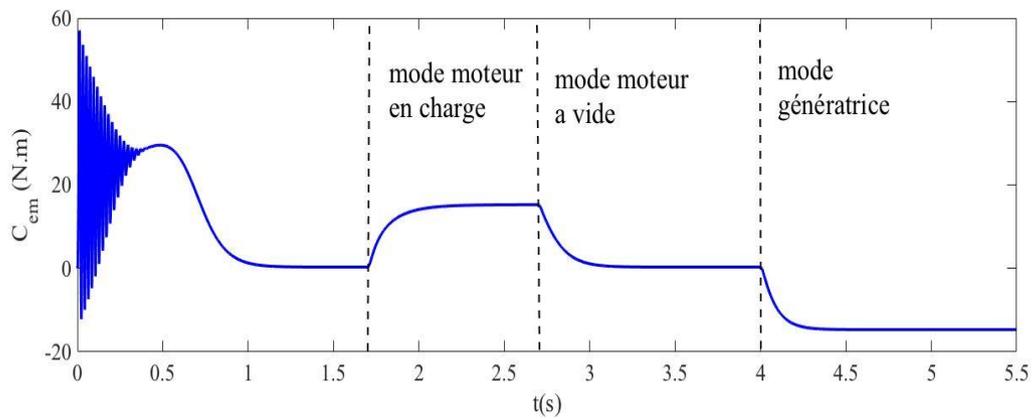


Figure 2.12 - Allure du couple électromagnétique

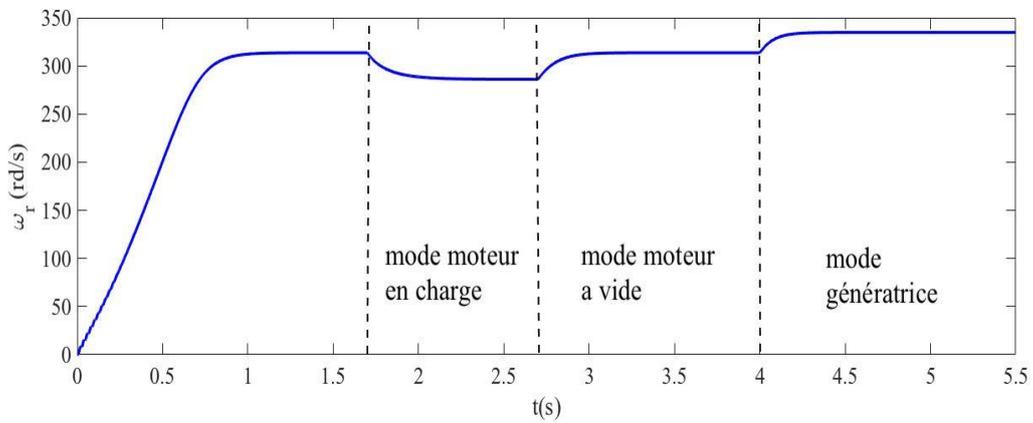


Figure 2.13 - Allure de la vitesse de rotation

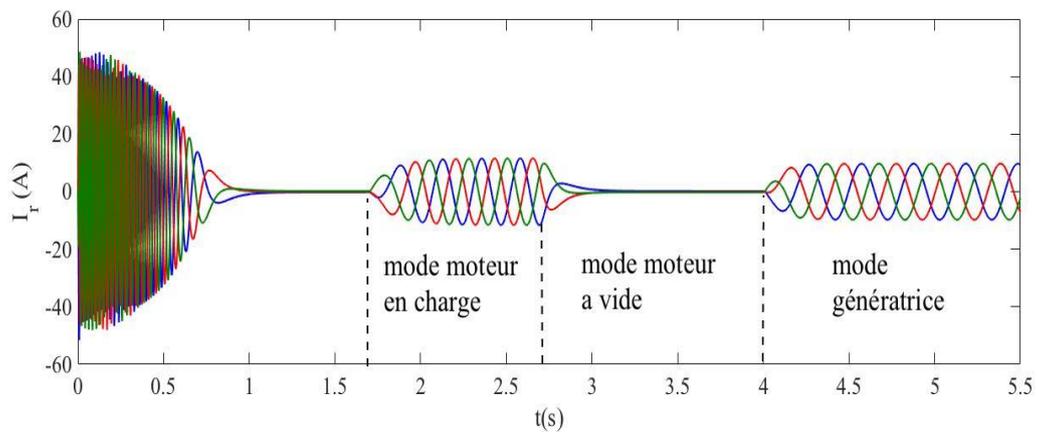


Figure 2.14 - Allure des courants rotoriques

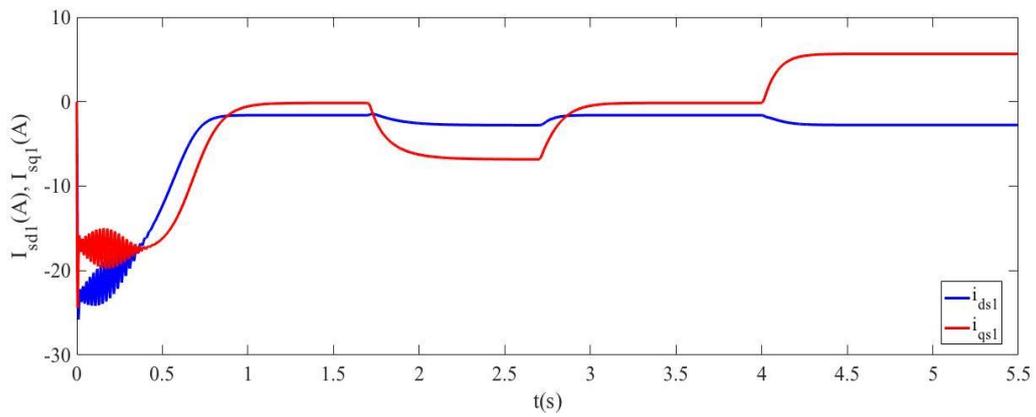


Figure 2.15 - Allure des courants statoriques direct et en quadrature de la première étoile

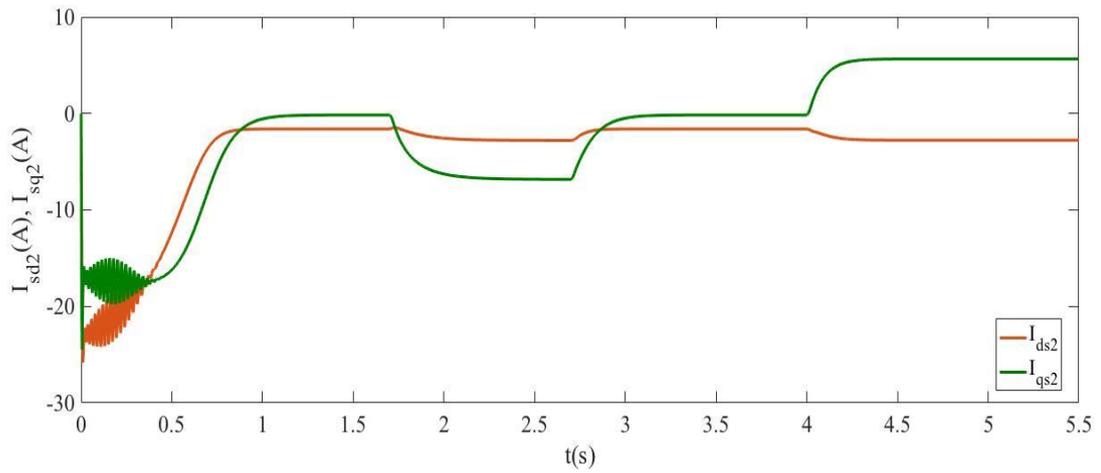


Figure 2.16 - Allure des courants statoriques direct et en quadrature de la deuxième étoile

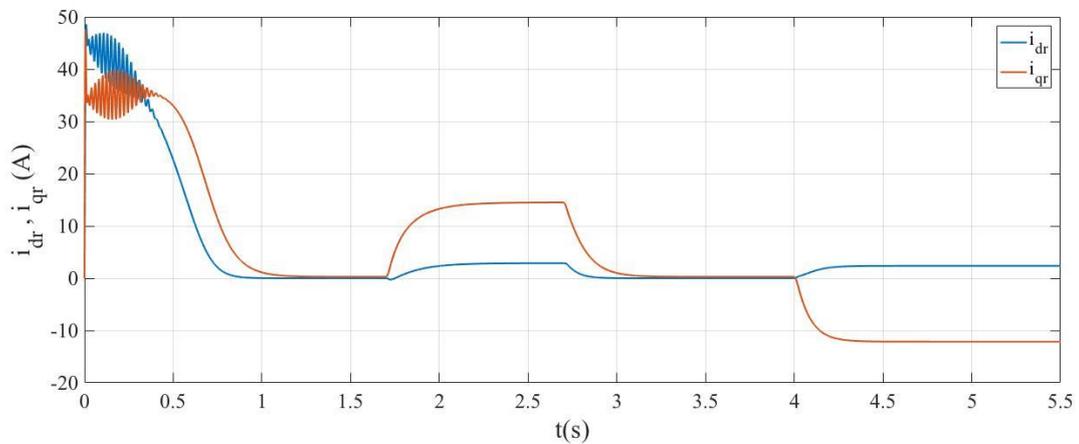


Figure 2.17 - Allure des courants rotoriques direct et en quadrature

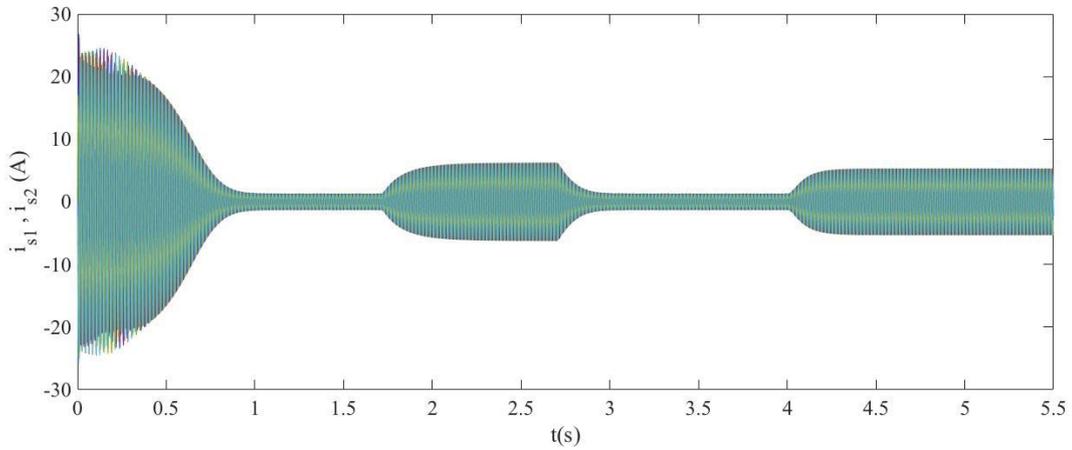


Figure 2.18 - Allure des courants statoriques de la première et la deuxième étoile

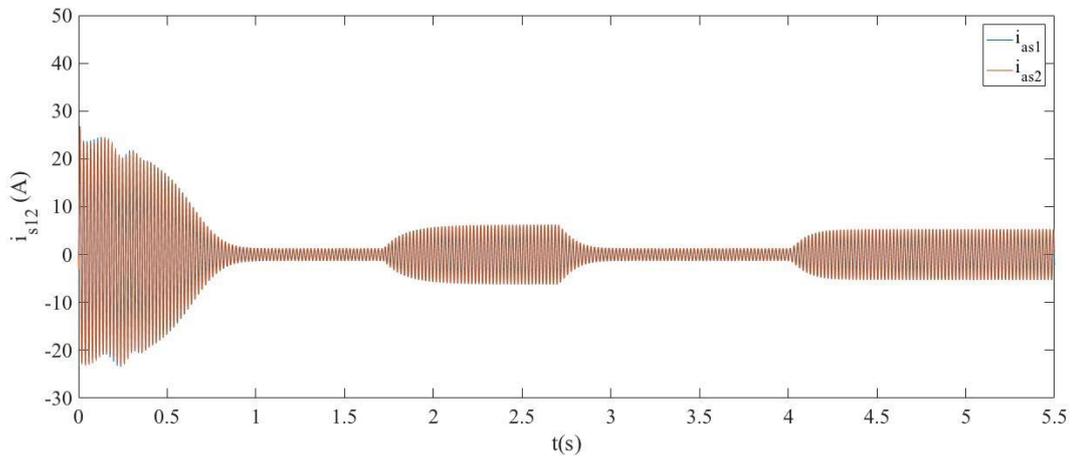


Figure 2.19 - Allure des courants statoriques de la première phase des deux étoiles

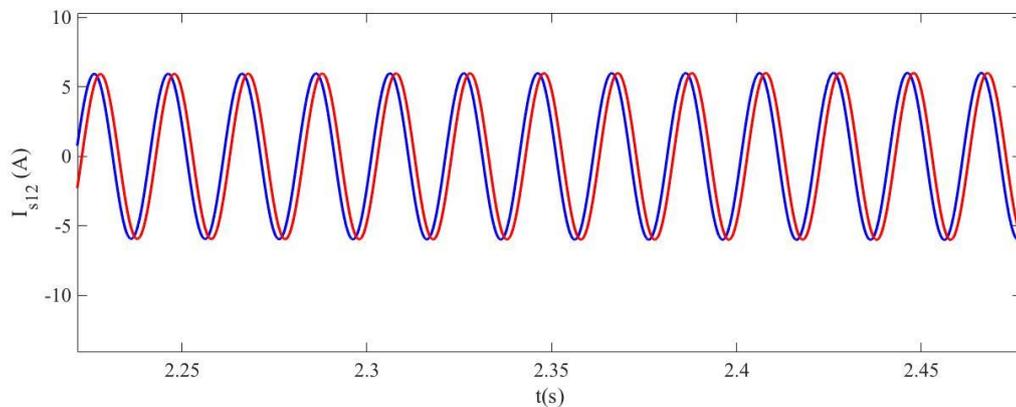


Figure 2.20 - Zoom des courants statoriques de la première phase des deux étoiles

## 2.5 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande M.L.I

### 2.5.1 Modélisation de l'onduleur

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

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois bras où chacun est composé de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

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

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

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

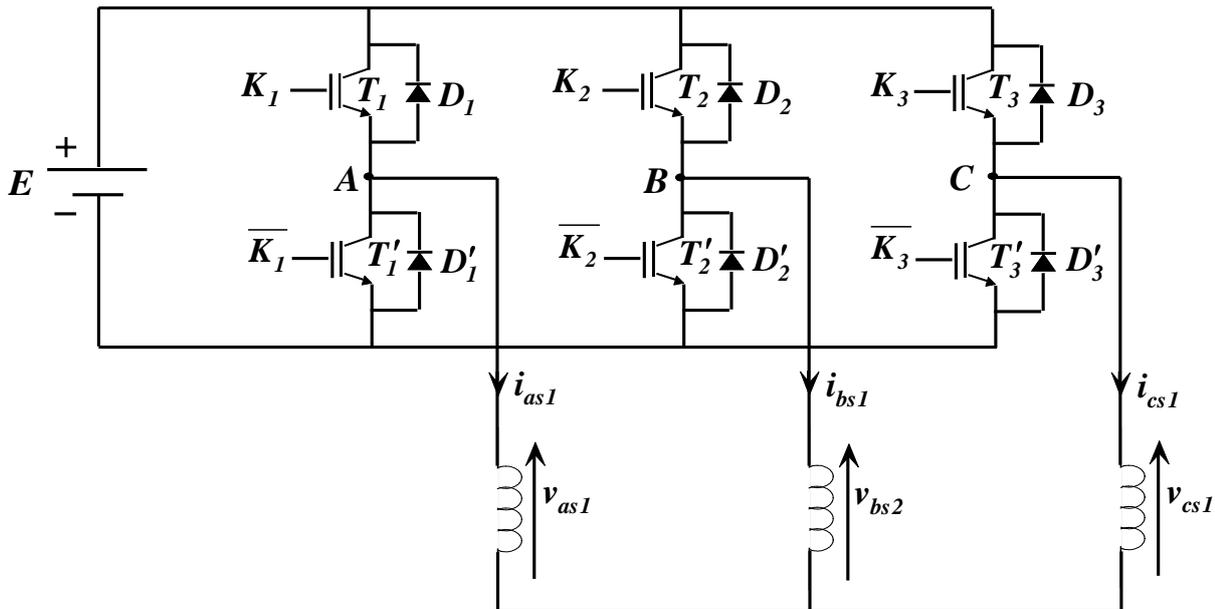


Figure 2.21 - Schéma de l'onduleur triphasé

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (2.39)$$

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

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (2.40)$$

La résolution du système d'équations (2.39) et l'équation (2.40) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = E/3 \left\{ \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.41)$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = E/3 \left\{ \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.42)$$

## 2.5.2 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire [AMI08].

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

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

- Pour la première étoile : espace dans les équations

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi/t) \\ v_{b1}^* = v_m \sin(\frac{2\pi}{t} - 2\pi/3) \\ v_{c1}^* = v_m \sin(\frac{2\pi}{t} + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.43)$$

- Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations (2.43),  $(2\pi ft)$  par  $(2\pi ft - \alpha)$  et l'indice 1 par 2.
- L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_{pr}(t) = \begin{cases} v_{pm} \left[ 4 \left( \frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] \text{ si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ v_{pm} \left[ -4 \left( \frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] \text{ si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (2.43)$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation (m)égal au rapport de la fréquence de modulation (f<sub>p</sub>) sur la fréquence de référence (f).
- Le coefficient de réglage en tension (r)égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (v<sub>m</sub>) à la valeur crête de l'onde de modulation (v<sub>pm</sub>).

### 2.5.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La représentation schématique de l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension à commande M.L.I sinus-triangle est donnée par la figure (2.22).

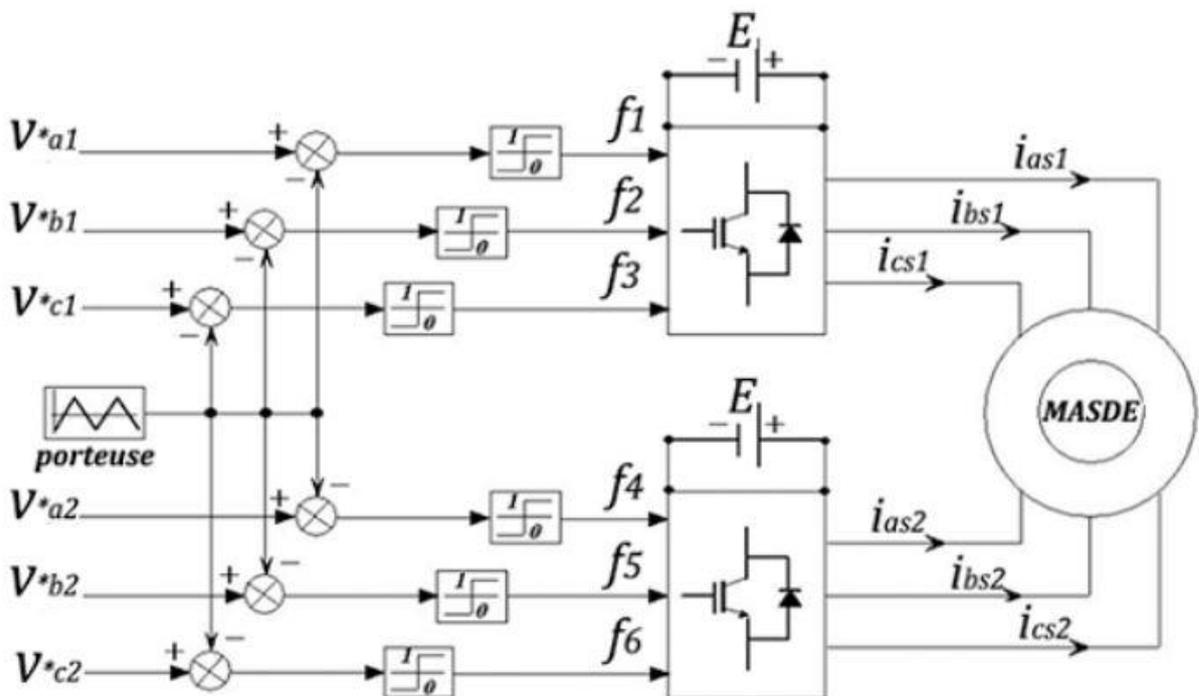
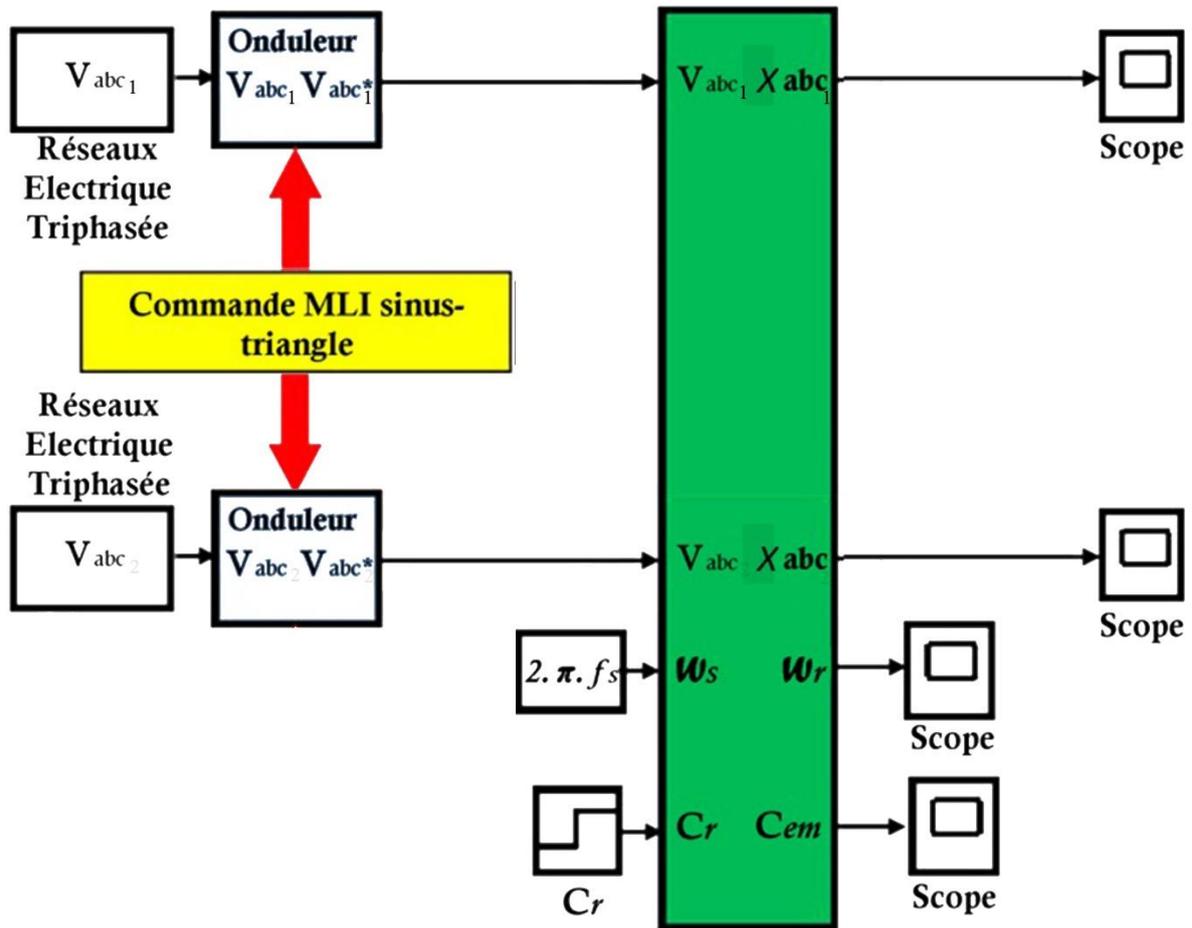


Figure 2.22 - Schéma MASDE-convertisseur de tension à commande MLI

## 2.5.4 Simulation et interprétation des résultats

La structure en schéma bloc de cette simulation est représentée par la figure (2.23)



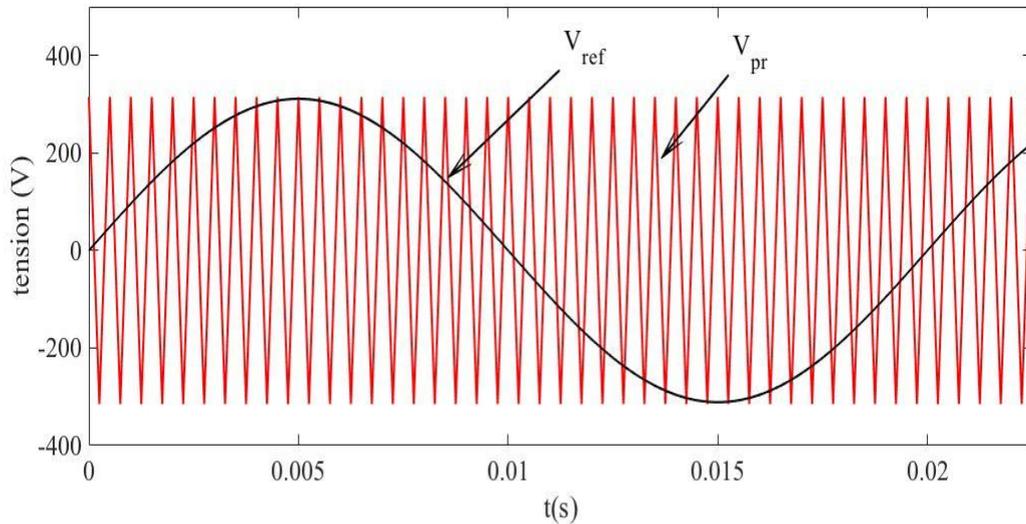
**Figure 2.23** - Schéma bloc global de simulation de la MASDE alimentée par un onduleur M.L.I.

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

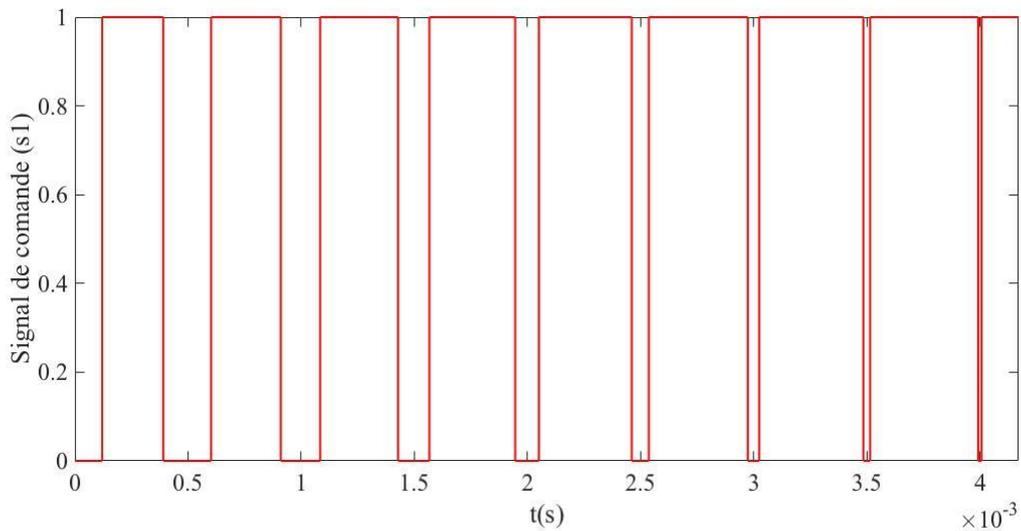
Les figures (2.24\_2.32) représentent l'évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à commande M.L.I. sinus-triangle dont  $r = 1$  et  $m = 21$ , suivi de l'application des charges  $C_r = 15$  et  $-15\text{N.m}$  respectivement entre les intervalles de temps  $t = [1.7, 2.7]$  et  $[4, 5.5]$  seconde.

Cette dernière montre que les résultats obtenus sont approximativement similaires avec ceux obtenus par l'alimentation directe figures (2.3\_2.8). Cependant, ces allures et en particulier celles, du couple électromagnétique, des courants statoriques de (étoiles 1 et 2),

montrent que cette technique engendre une augmentation des ondulations dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs, qui se répercutent essentiellement sur le couple électromagnétique.



**Figure 2.24** - Signal de la porteuse et tension de référence



**Figure 2.25** - Signal de commande des interrupteurs de l'onduleur

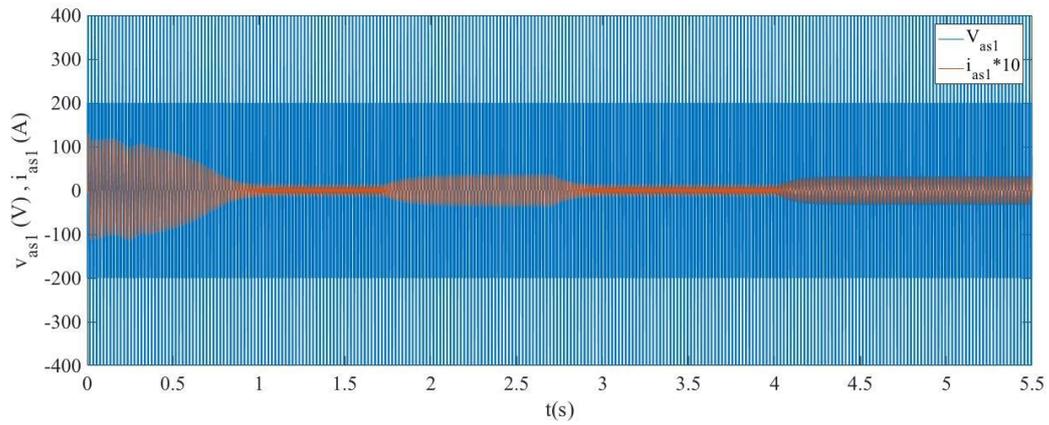


Figure 2.26 - Allure de la tension de sortie de l'onduleur et du courant de la première phase de la première étoile

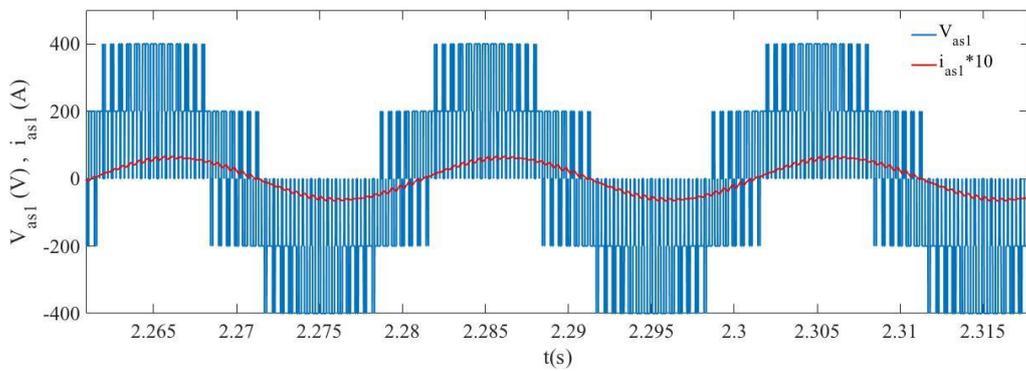


Figure 2.27 - Allure de tension de sortie de l'onduleur et le zoom de courant de la première phase de la première étoile

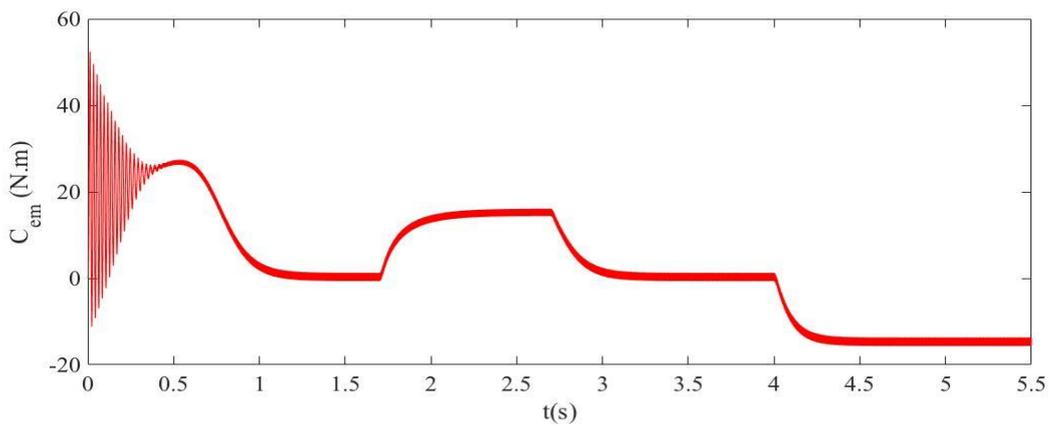


Figure 2.28 - Allure du couple électromagnétique

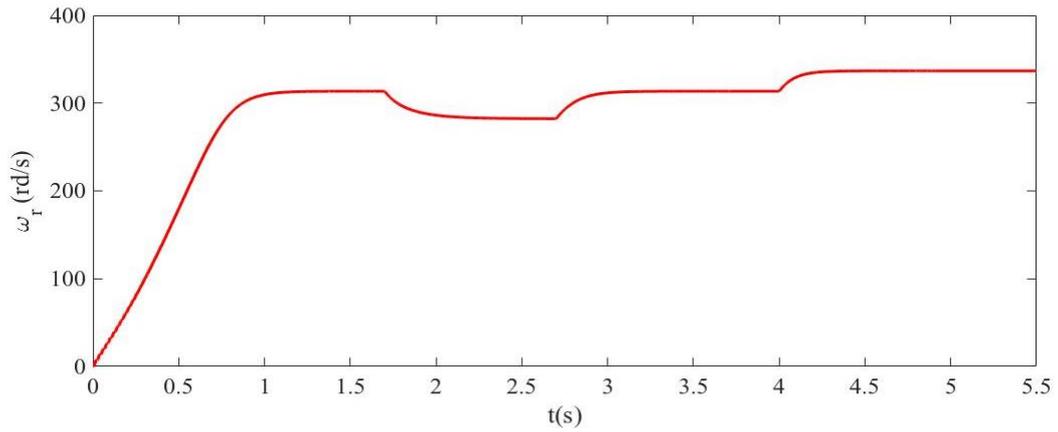


Figure 2.29 - Allure de la vitesse de rotation

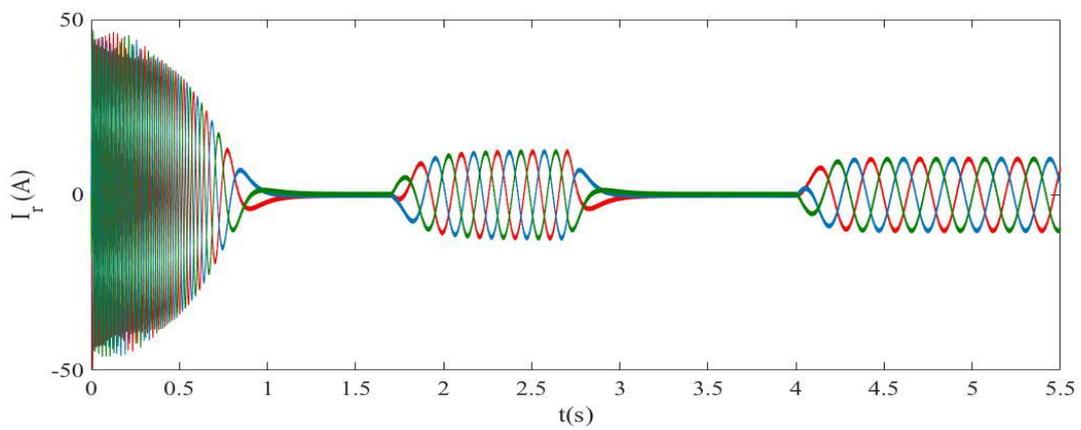


Figure 2.30 - Allure des courants rotoriques

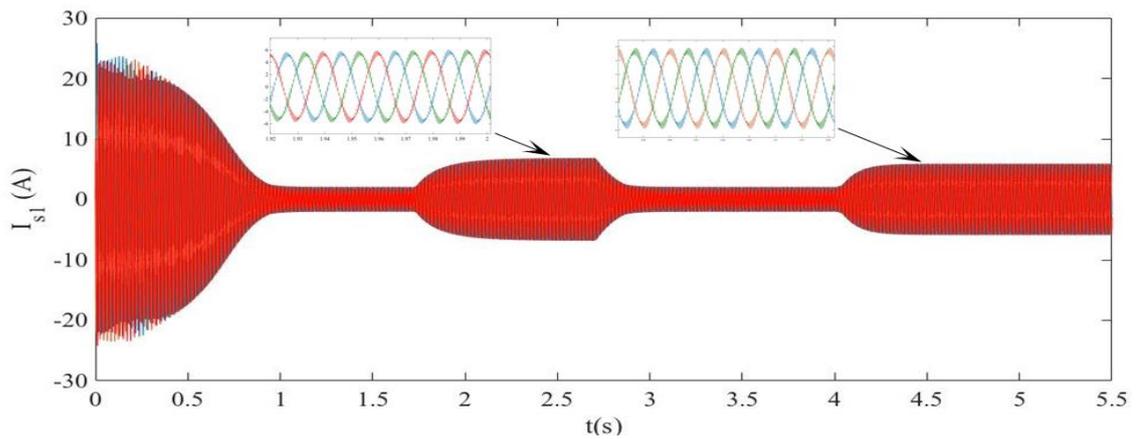


Figure 2.31 - Allure des courants statoriques de la première étoile

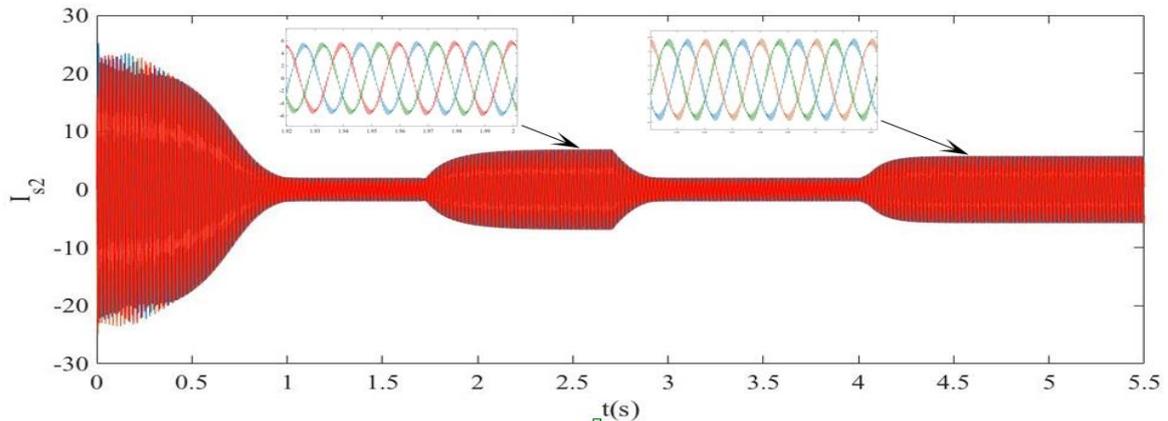


Figure 2.32 - Allure des courants statoriques de la deuxième étoile

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre une description de la machine asynchrone double étoile avec une modélisation dans les deux repères naturels (abc) et (d,q) a été effectuée tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

Une simulation de la MASDE par le logiciel Matlab/Simulink pour les modèles de Park et naturel sont élaborés, et cela pour faire une étude caractéristique de la MASDE directement alimentée par des sources sinusoïdales, on a conclu que les résultats de simulation sont identiques pour les deux modèles, le model naturel nous permettra de nouvelles simulations (mode dégradé par exemple) de la MASDE, l'inconvénient se régit sur le temps de simulation qui est assez grand.

Puis, une simulation de la MASDE alimentée par un onduleur M.L.I a été effectuée afin de pouvoir contrôler la vitesse de cette machine.

Dans le chapitre suivant, on procédera à des simulations de GASDE en modèle naturel en lui appliquant une commande vectorielle (commande par orientation du flux) puis on accomplira une connexion au réseau électrique.

# CHAPITRE 3

## CONTROLE DE LA GENERATRICE CONNECTEE AU RESEAU ELECTRIQUE

### 3.1 Introduction

La commande vectorielle de la génératrice asynchrone double étoile est une solution plus attractive pour des applications de hautes performances dans les systèmes à vitesse variable et ceux de production d'énergie, où le principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle ainsi le contrôle de la liaison au réseau électrique avec une régulation de vitesse seront décrits.

Un exemple de schéma de raccordement de cette machine dans un système de production relié au réseau électrique, dont la GASDE de 4.5KW, est contrôlée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI suivis d'un filtre sera présenté.

### 3.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle dite commande par orientation de flux, consiste à régler le couple par une composante du courant et le flux par l'autre composante, c'est-à-dire qu'on oriente une des composantes de flux statoriques, rotoriques ou de l'entrefer sur un axe de référentiel tournant à la vitesse de champ tournant. La commande vectorielle conduit à de hautes performances industrielles des entraînements asynchrones (machine de papeterie, laminoirs, traction électrique etc.) supportant les perturbations de la charge [\[BOU10\]](#).

### 3.3 Choix d'orientation du flux

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

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

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^* \quad (3.1)$$

$$\varphi_{qr} = 0$$

La relation finale du couple électromagnétique devient :

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

D'après l'équation (3.2), on constate que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée [CHE15].

### 3.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle

#### 3.4.1 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 [IDE17] :

- 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.

### 3.4.2 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 [HAM07].

## 3.5 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  $\phi_r^*$ . On considère comme grandeurs de références le flux rotorique et le couple  $C_{em}^*$ .

La **figure (3.1)** représente le schéma de principe de la commande à flux orienté.



**Figure 3.1** - Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

En remplaçant l'équation (3.1) dans les équations des tensions rotoriques (2.27), on obtient :

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

À partir des équations (2.36) et (2.37), on trouve :

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

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

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

En introduisant (3.5), (3.6) dans le système d'équations des flux statoriques (2.28), on aura :

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

Avec :

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

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

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

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

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

En remplaçant (3.7) et (3.9) dans le système d'équations des tensions statoriques (2.27), on obtient :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Où :

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

### 3.5.1 Application de la commande indirecte sur la MASDE

L'application de la commande vectorielle indirecte sans le réglage de vitesse sur la GASDE est illustrée par la figure (3.2).

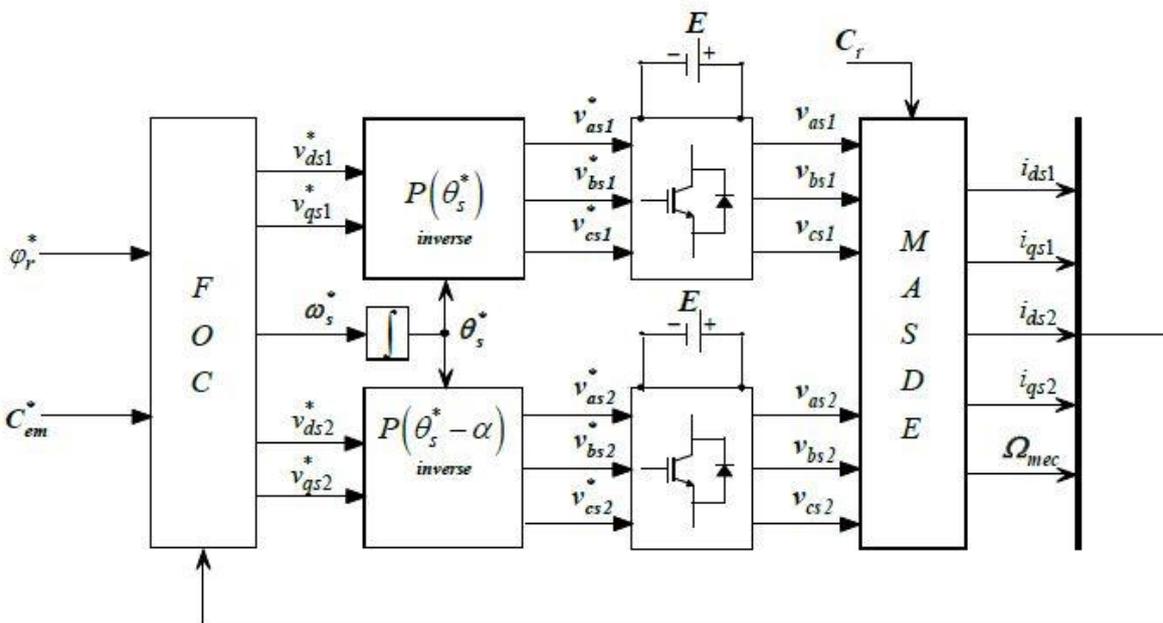


Figure 3.2 - Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE

### 3.6 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_r^* = \phi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \phi_r^* = \phi_n \frac{\Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

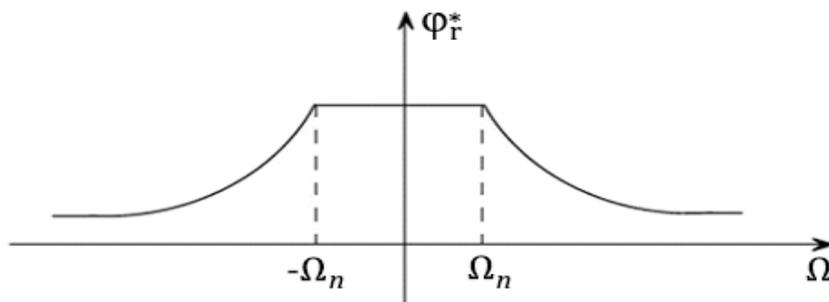


Figure 3.3 - Schéma de principe du défluxage [CHE15]

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale, pour des vitesses rotorique inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine  $\Omega_n$ . 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 (3.4).

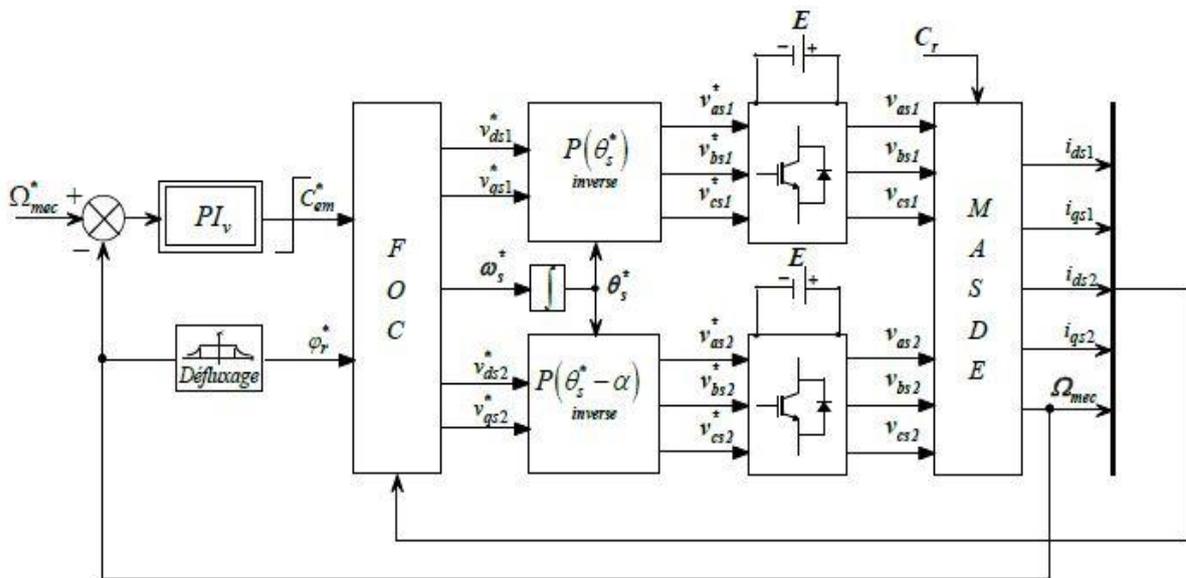


Figure 3.4 - Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse [AMI08]

### 3.6.1 Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure (3.5)

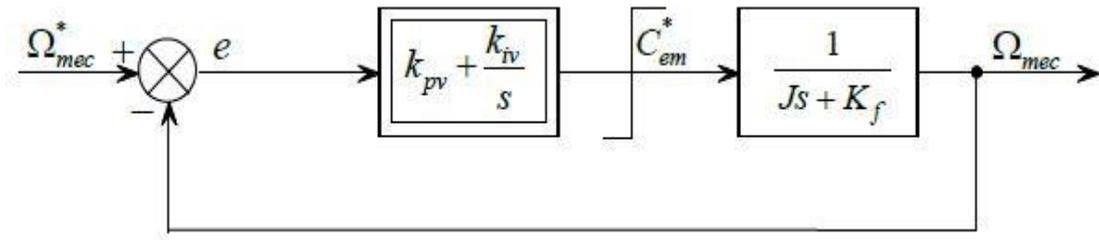


Figure 3.5 - Boucle de régulation de vitesse

L'identification donne :

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

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

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

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

Le schéma bloc de découplage en tension (Field Oriented Control, FOC) est représenté sur la figure (3.6), sachant que  $(i_{ds1}^*, i_{qs1}^*, i_{ds2}^*, i_{qs2}^*)$

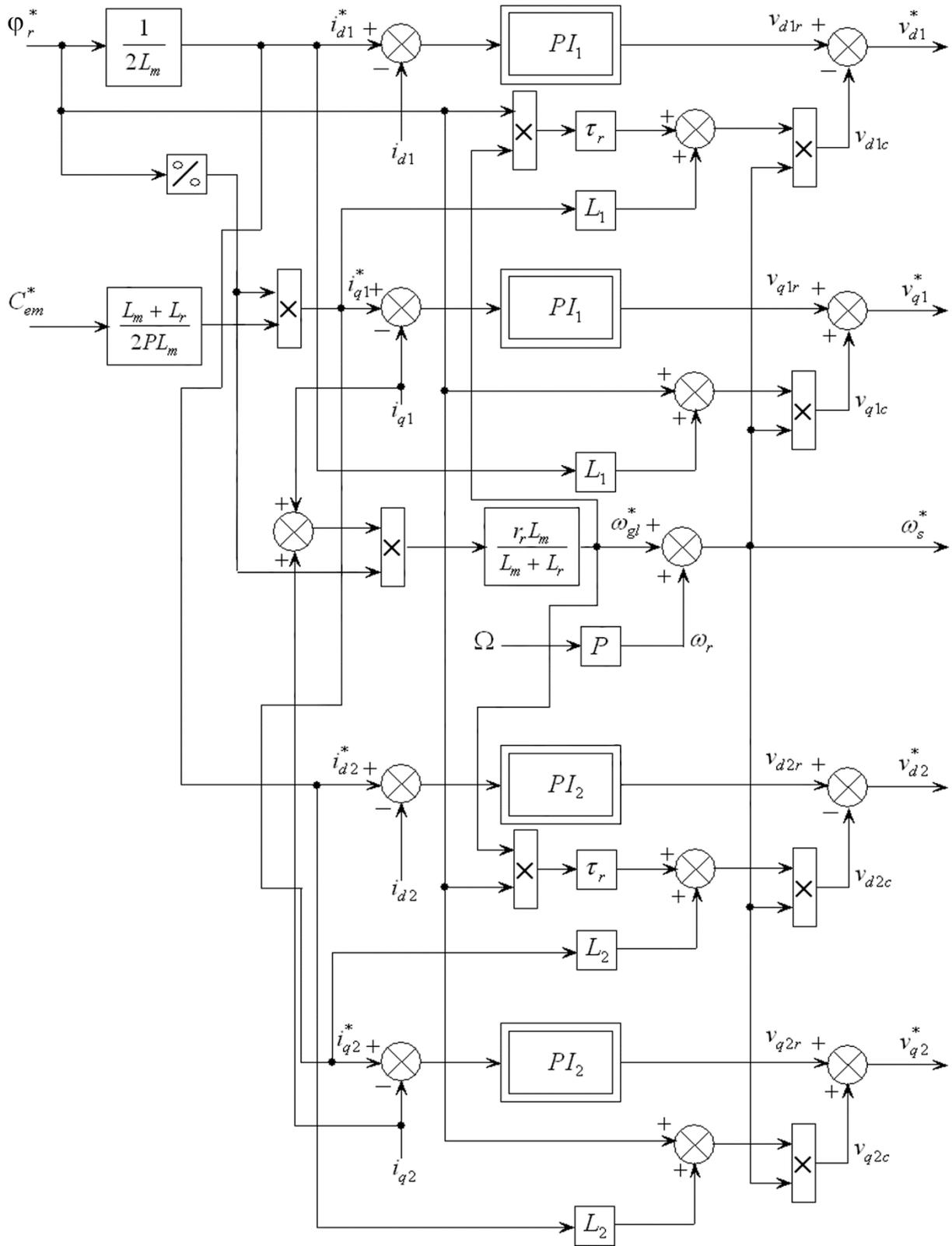


Figure 3.6 - Schéma bloc de découplage en tension [CHE15]

## 3.6.2 Contrôle de la liaison au réseau

### 3.6.2.1 Description de la chaîne de production

Notre chaîne de production est constituée d'une MASDE, des convertisseurs statiques suivis d'un filtre de raccordement au réseau électrique.

La génératrice d'une puissance de 4.5KW est contrôlée afin d'atteindre l'objectif qui régit sur une régulation de vitesse.

La puissance fournie par une génératrice est toujours variable à cause des variations de la vitesse. La puissance réactive de référence mise en jeu par le générateur, afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire coté réseau, est maintenue nulle et la puissance active de référence injectée au réseau correspond à la puissance nominale de la GASDE.

### 3.6.2.2 Modélisation du circuit de filtrage

#### a. Schéma de principe

La figure (3.7) représente le schéma de principe du filtre

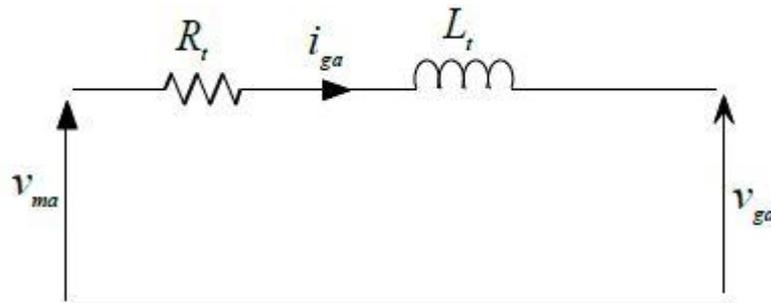


Figure 3.7 - Schéma représentatif du filtre connecté au réseau électrique

#### b. Modélisation du filtre dans le repère de Park

On peut modéliser ce circuit par les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{ma} \\ v_{mb} \\ v_{mc} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ga} = V_m \sin(\omega_s t) \\ v_{gb} = V_m \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{gc} = V_m \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right\}$$

En appliquant la transformation de Park à l'équation (3.19), on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dm} = R_t i_{dg} + L_t \frac{d}{dt} i_{dg} - L_t \omega_s i_{qg} + v_{dg} \\ v_{qm} = R_t i_{qg} + L_t \frac{d}{dt} i_{qg} - L_t \omega_s i_{dg} + v_{qg} \end{array} \right\} \quad (3.20)$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_d = L_t \omega_s i_{dg} \\ e_q = -L_t \omega_s i_{qg} \end{array} \right\} \quad (3.21)$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dm} - v_{dg} = (R_t + sL_t) i_{dg} - L_t \omega_s i_{qg} \\ v_{qm} - v_{qg} = (R_t + sL_t) i_{qg} + L_t \omega_s i_{dg} \end{array} \right\} \quad (3.22)$$

Les équations des courants à la sortie du filtre sont comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{dg} = \frac{1}{R_t + L_t s} (v_{dm} - v_{dg} - e_{qg}) \\ i_{qg} = \frac{1}{R_t + L_t s} (v_{qm} - v_{qg} - e_{dg}) \end{array} \right\} \quad (3.23)$$

Les tensions simples de références pour le réseau exprimées dans le repère de Park sont données par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dm}^* = v_{dg}^* + v_{dg} - \omega_s L_t i_{qg} \\ v_{qm}^* = v_{qg}^* + v_{qg} - \omega_s L_t i_{dg} \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dg}^* = PI(i_{dg}^* - i_{dg}) \\ v_{qg}^* = PI(i_{qg}^* - i_{qg}) \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

### c. Régulations des puissances

Les puissances active et réactive transitées au réseau sont données par les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_g = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \\ Q_g = v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg} \end{array} \right\} \quad (3.26)$$

L'équation (3.26), permet d'imposer des références pour la puissance active  $P_r^*$  et la puissance réactive  $Q_r^*$  en imposant les courants de références exprimés dans le référentiel de Park comme suit :

$$\begin{cases} i_{dg}^* = \frac{P_g^* v_{dg} + Q_g^* v_{qg}}{v_{dg}^2 + v_{qg}^2} \\ i_{qg}^* = \frac{P_g^* v_{qg} + Q_r^* v_{dg}}{v_{dg}^2 + v_{qg}^2} \end{cases} \quad (3.27)$$

La puissance réactive de référence est imposée nulle d'où le facteur de puissance coté réseau électrique est unitaire.

$$Q_g^* = 0 \quad (3.28)$$

La figure suivante présente un schéma bloc du système étudié introduit sous l'environnement MATLAB/Simulink :

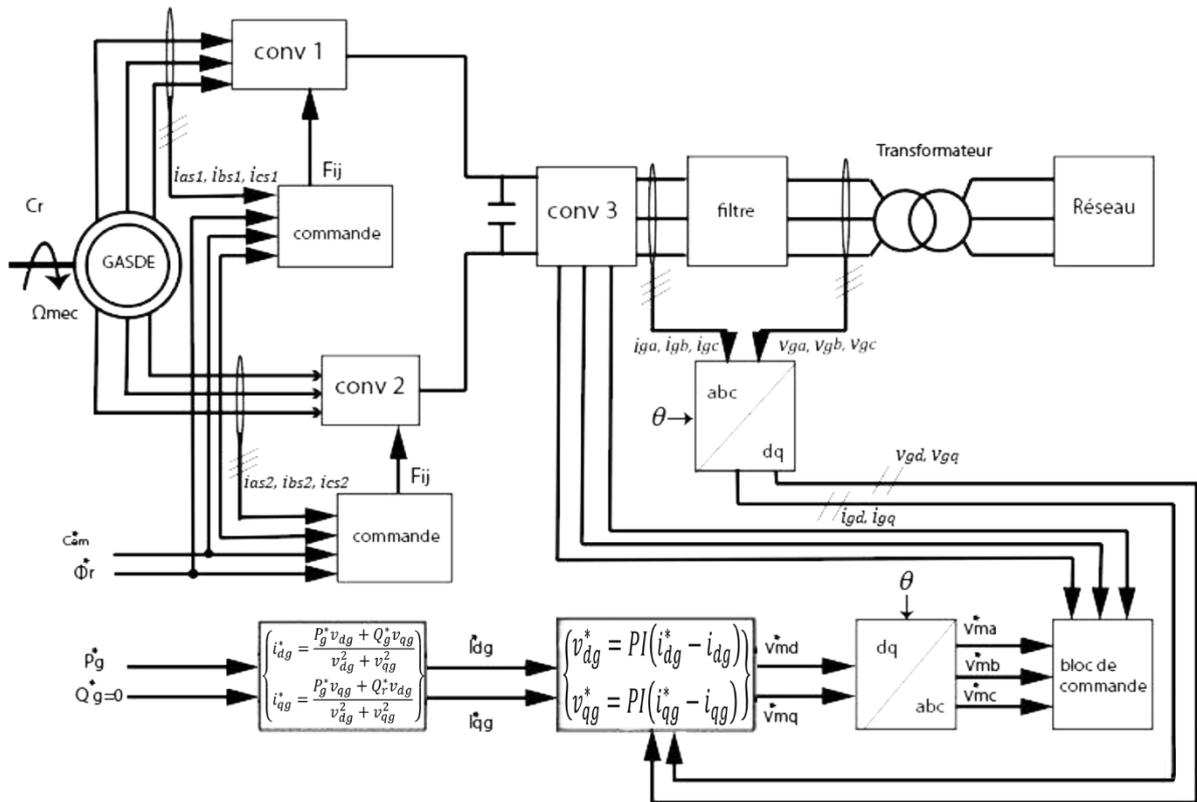


Figure 3.8 - Schémas bloc du système étudié

### 3.6.3 Simulation et interprétation des résultats

La simulation sous Matlab/Simulink du système global dont les paramètres sont donnés, permet l'obtention de différentes grandeurs caractéristiques du système étudié.

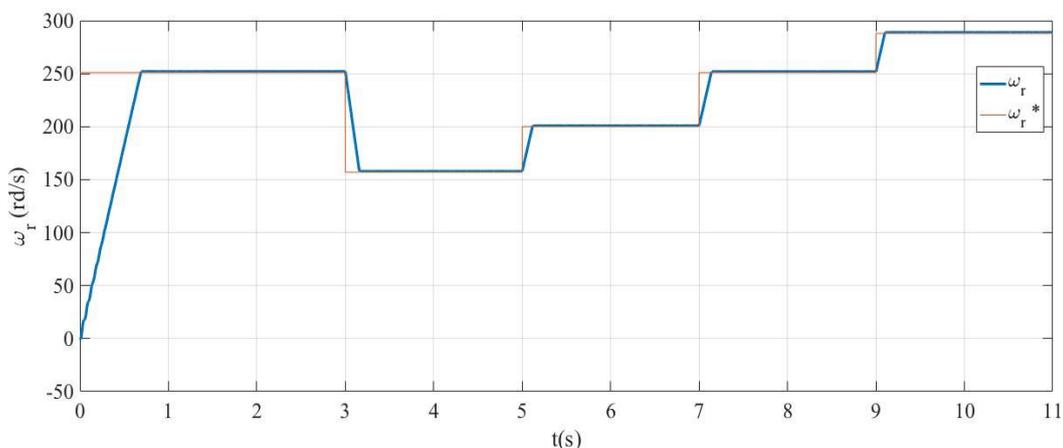
Les figures (3.9-3.14) représentent l'évolution des caractéristiques de la GASDE par la commande vectorielle indirecte le réglage de la vitesse (par orientation du flux rotorique), en imposant le flux de référence  $\phi_r^* = 0.7(\text{Wb})$  et la vitesse mécanique de référence sous forme de créneaux  $\omega_r^* = [251, 157, 200, 251, 288](\text{rad/s})$  respectivement suivant les intervalles de temps  $t = [0, 3 : 2 : 11]$  (s).

La figure (3.10) représente l'allure de couple électromagnétique où il suit fidèlement la variation de la vitesse et cela pour fournir la puissance nominale de la machine. La figure (3.9) représente l'allure de la vitesse mécanique et on remarque que la vitesse de rotation suit parfaitement sa consigne, qui est variable selon la vitesse imposée.

La figure (3.12) illustre, les courants des deux étoiles et leur représentation en zoom. La construction de la GASDE impose qu'il y a un décalage d'un angle électrique ( $\alpha = 30^\circ$ ) entre la première étoile devant la deuxième.

Pour maintenir le facteur de puissance du côté réseau unitaire, la puissance réactive de référence du réseau, ( $Q_r^*$ ) est fixée à une valeur nulle. Les figures (3.13-3.14) représentent les puissances active et réactive fournies au réseau.

La figure (3.11) montre que la tension est imposée par le réseau et l'amplitude du courant injecté au réseau et imposé par la commande. On a montré que la tension et le courant du réseau sont en opposition de phase, cela justifie que l'écoulement de puissance est toujours vers le réseau de plus la puissance réactive reste nulle.



**Figure 3.9** - Allure de la vitesse de rotation et de la vitesse de rotation de référence

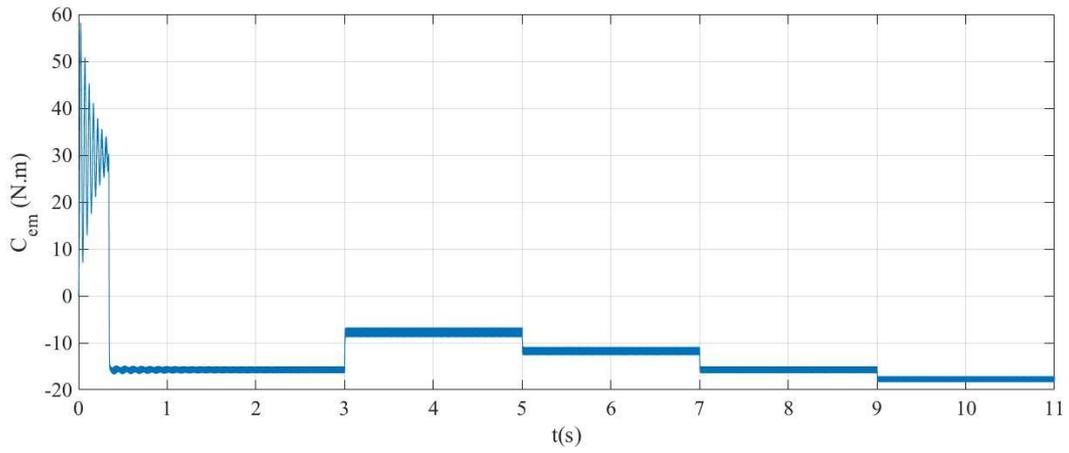


Figure 3.10 - Allure du couple électromagnétique

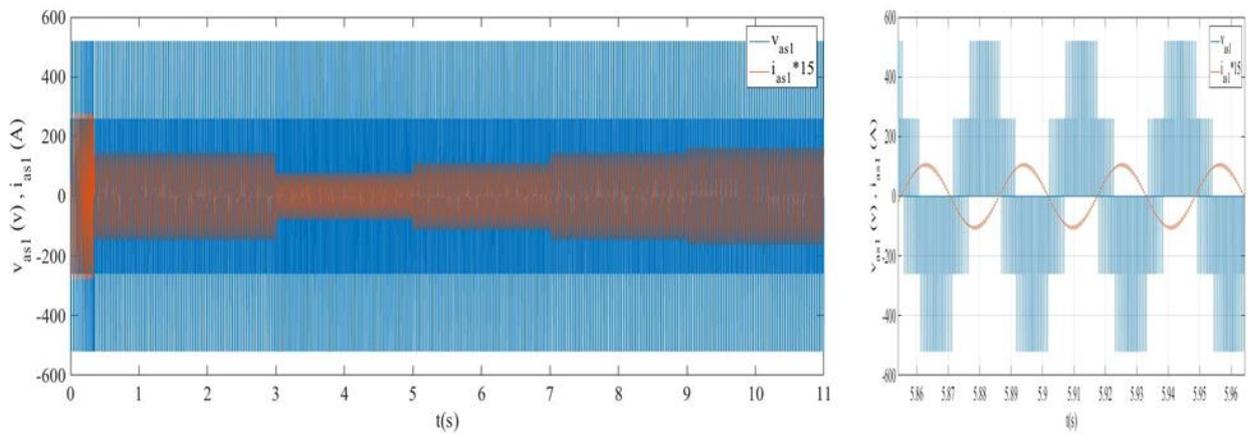


Figure 3.11 - Allure de la tension de sortie de l'onduleur et du courant de la première phase de la première étoile avec le zoom du courant

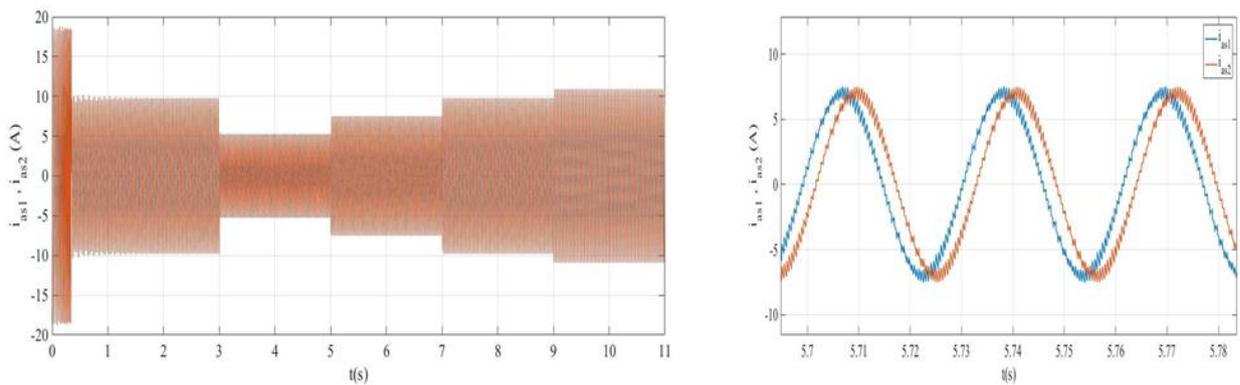
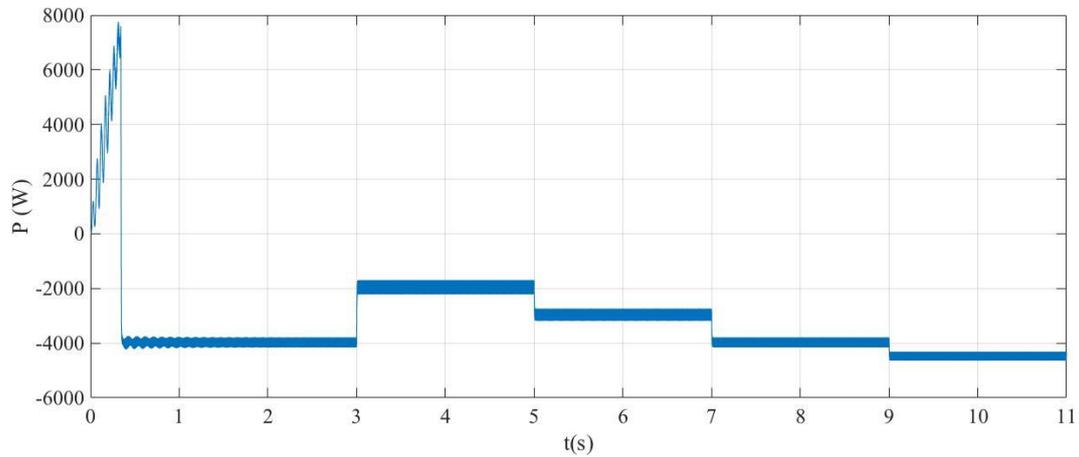
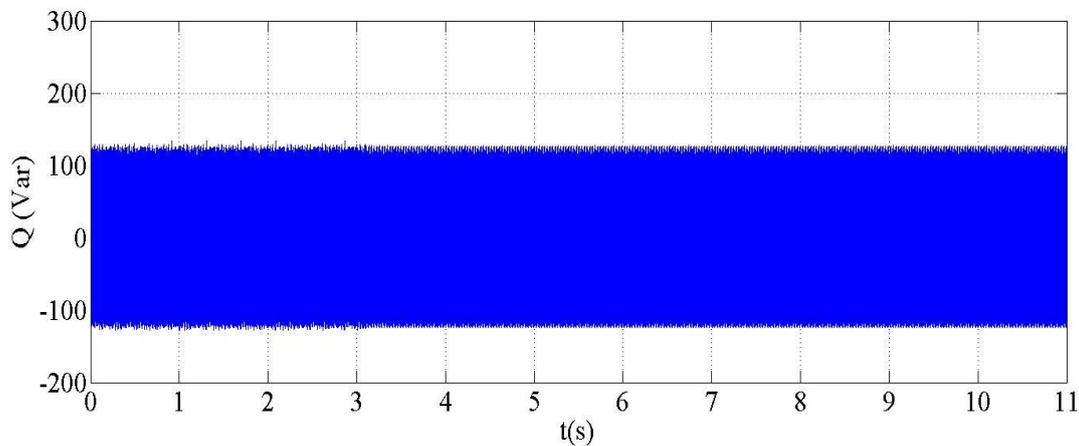


Figure 3.12 - Allure des courants statoriques de la première phase des deux étoiles



**Figure 3.13** - Allure de la puissance électrique active coté réseau électrique



**Figure 3.14** - Allure de la puissance réactive coté réseau électrique

### 3.7 Conclusion

La GASDE à cage fait l'objet de plusieurs études récentes portant sur le développement de celle-ci, du moment qu'elle offre principalement : la segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, grande fiabilité et l'utilisation de cette dernière dans les projets de fortes puissances.

Le travail présenté dans ce chapitre est consacré au contrôle de la GASDE connecté au réseau électrique. D'où on a envisagé le contrôle vectoriel et le principe du contrôle à facteur de puissance unitaire (FOC).

Une commande en vitesse est appliquée à la génératrice en utilisant le principe de la commande vectorielle indirecte suivi d'une régulation de la vitesse. Des résultats de simulation sont présentés pour valider les modèles mathématiques utilisés.

# CONCLUSION GENERALE

Le contrôle de la génératrice asynchrone double étoile en utilisant la commande vectorielle alimentée par deux onduleurs de tension contrôlés par la technique M.L.I, et commandée par orientation du flux rotorique suivi d'une analyse de la GASDE connectée au réseau électrique, dans le but de mieux l'exploiter dans les systèmes de génération de l'énergie électrique, a fait l'objet principal de ce mémoire.

Dans le premier chapitre, un rappel sur les différentes sources d'énergies existantes, particulièrement les énergies renouvelables et quelques systèmes de production d'énergies électriques, cette dernière a fait l'objet de grandes recherches afin d'éviter ou plus au moins de minimiser et combattre le réchauffement climatique qui menace l'avenir de l'humanité , ce chapitre nous a permis aussi, d'améliorer et d'enrichir nos connaissances sur les différents types de machines électriques, l'origine et l'intérêt de l'utilisation des machines multiphasées dans le domaine de grande puissance.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la MASDE dans le repère naturel dit (abc) et dans (d,q) et son alimentation. Pour cela, on a commencé par la simulation de la machine directement alimentée par deux sources triphasées et équilibrées dans les deux repères, puis par deux onduleurs de tension à commande M.L.I, et ce afin de mieux maîtriser notre machine.

Nous avons dédié le troisième chapitre à la commande de l'ensemble onduleur-machine asynchrone multiphasée double étoile pour objectifs consubstantiels, le contrôle de la vitesse et du flux de la machine. Ce chapitre a servi à l'élaboration de la commande à flux rotorique orienté (FOC), on a utilisé la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) dans le repère (abc), ce qui a donné des résultats convaincants et répondre à beaucoup de questions posées et de réflexions proposées auparavant par des chercheurs dans le domaine.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrés, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter la machine sont envisageables :

- Remplacement des onduleurs à deux niveaux par les multi-niveaux pour améliorer la qualité de l'énergie ;

- L'étude de l'ensemble machine-convertisseur en mode dégradé ;
- L'élaboration d'une commande (on line) pour l'ensemble machine-convertisseur en mode dégradé ;
- L'intégration de la GASDE dans un parc éolien.

## ANNEXES

**Tableau 3 . A.1** Paramètres de la MASDE [AMI08]

Puissance nominale	$P_n=4.5KW$
Tension nominale	$V_n=220V$
Vitesse nominale(synchronisme)	$N_n =3000tr/mn$
Fréquence nominale	$f_s=50Hz$
Résistances d'une phase statoriques (étoile 1 et 2)	$R_{s1}=R_{s2}=3.72\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r=2.12\Omega$
Inductances de fuites d'une phase statoriques (étoiles 1et2)	$L_{s1}=L_{s2}=0.022H$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r=0.006H$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$L_m=0.3672H$
Moment d'inertie	$J=0.0625 kg .m^2$
Coefficient de frottement	$K_f=0. 001N.m.s/rd$
Nombre de paires de pôles	$p=1$

## BIBLIOGRAPHIE

- [ABE16]** Aberbour Adel, Contribution à l'Amélioration des Performances d'une Chaîne de Conversion Éolienne Autonome, thèse de doctorat, université de Bejaia, Algérie, 2016.
- [ACH18]** N. Achat, Etude et Simulation de la Machine Asynchrone Double Etoile dans le repère abc en modes Normal et Dégradé, Mémoire de Master en électrotechnique, Université Abderrahmane mira de Bejaia, Algerie 2018.
- [AMI08]** H. Amimeur, Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement, Mémoire de Magister de l'université de Batna, Algérie, 2008.
- [BEL02]** M. Belhamel, Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien-Photovoltaïque -Diesel), Rev. Energ. Ren.: Zones Arides (2002) 49-54.
- [BEL06]** M. R. Benhaddadi, Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 199 – 209.
- [BER16]** F.Berrabah, Commande sans capteur de la machine asynchrone, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algerie 2016.
- [BOU 10]** Boussaila Boubakr , Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux Application sur la Machine Heptaphasée, thèse de Magister , Ecole national polytechnique, Algérie, 2010
- [CHE15]** S. Chekkal, Intégration des Génératrices Asynchrones à Double Etoiles dans un Système Eolien, Thèse Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie 2015.
- [DIE14]** Dieng Abdoulaye, Modélisation dynamique et Commande d'un ensemble « génératrice synchrone pentaphasée à FEM non sinusoïdale – convertisseur AC/DC » tolérant aux défauts, thèse de doctorat, université de Nantes France, 2014.
- [HAD01]** D. Hadiouche, Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : Modélisation, alimentation et structure, Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, France, décembre 2001.
- [HAM07]** Hamadache. M, Ouaret, «*Commande d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire d'ingénieur*», université de Bejaia, Algerie 2007.
- [IDE17]** O. IDER, F. YAHYA, Etude et commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile, Mémoire fin de cycle de l'université de Bejaia, Algerie 2017.

**[IDJ10]** Idjedarene Kassa, Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes, thèse de doctorat , université de Bejaia, Algérie, 2010

**[IFF16]** K. Iffouzar, Etude et Contrôle des Machines Asynchrones Polyphasées en Modes Normal et Dégradé. Application dans un Système Embarqué, Thèse Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie 2016.

**[IRENA18]** *Global Energy Transformation : A Roadmap to 2050* (Transformation énergétique mondiale : une feuille de route pour 2050), Agence internationale de l'énergie renouvelable, Abu Dhabi (ISBN 978-92-9260-059-4).

**[LAK14]** M LAKHDARI, Simulatuin et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénération, Mémoire de Magister de l'université FERHAT ABBAS-SETIF-1,Algerie 2014.

**[Lud11]** Ludmil Stoyanov, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, Thèse de Doctorat de l'université Pascal Paoli, 28 octobre 2011.

**[MAD04]** Madani Nadia, Commande A Structure Variable D'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée Par Deux Onduleurs Mli, thèse de doctorat, université de Nantes France, 2004.

**[MEK13]** T.MECHEDDAL, Etude d'un convertisseur DC/DC appliqué aux systèmes photovoltaïques, Mémoire de fin de cycle master électrotechnique de l'université de bejaia, Algerie 2013.

**[MER13]** E.Merrabet, Amélioration des Performances de Regulation d'une Machine Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle, thèse doctorat, Université Hadj lekhdar Batna algerie, 2013.

**[TUT14]** 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.

**[YAH11]** Yahdou Adil , Commande et Observation par Modes Glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique , thèse de Magister , université de chlef, Algérie, 2011.

#### Site internet :

**[Site01]** <https://bacmoteur.files.wordpress.com/2012/05/5emephoto>

**[Site02]** <https://www.wegfrance.news/wp-content/uploads/2017/11/coupe-moteur-synchrone>