



UNIVERSITE ABDERRAHMANE  
MIRA – BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

*En vue d'obtention du diplôme Master en Electrotechnique*

*Option : Électrotechnique industrielle et commandes électriques.*

**Thème :**

***Évaluation des performances d'une génératrice à double étoile dans un système de conversion de l'énergie éolienne en fonctionnement autonome***

**Présenté par :**

M<sup>lle</sup> MEDDAH WAHIBA

M<sup>lle</sup> YACHI YASMINE

**Encadré par :**

M<sup>me</sup> CHEKKAL SAMIRA

M<sup>r</sup> HAMITOUCHE KAMEL

**Devant les membres de jury composé de :**

M<sup>r</sup> R. SAOU

M<sup>me</sup> S. BELAID

*Promotion 2022-2023*

## Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail*

*Au terme de mon travail*

*On tient à remercier notre promotrice Mme S. CHEKKAL et Mr K. HAMMITOUCHE, pour leurs encadrements très appréciés avec une grande rigueur scientifique, pour la confiance qu'ils nous ont témoignée, pour leurs disponibilités et leurs encouragements, qui nous ont permis de mener à bien finir cette étude.*

*Nous tenons à présenter nos remerciements les plus chaleureux au président et au membre de jury pour avoir accepté de juger notre travail.*

*Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille, surtout nos parents qui nous ont toujours encouragé, on tient à les remercier.*

*Enfin on tient à exprimer vivement nos remerciements avec une profonde gratitude a toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*





*Dédicace*

*J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail :*

*À ceux qui donnent sans recevoir, se brûlent pour que leur fille voie la lumière du savoir, à ceux qui ont été toujours la source d'inspiration et de courage, à ceux qui tous les mots du monde ne suffisent pas pour leurs montrer mon amour ; à mes très chers parents, les prunelles de mes yeux,*

*À mon cher frère : ABD EL MALÉK,*

*À mes chères sœurs : FATIMA et NOUR EL HOUDA.*

*À tous mes amis que j'ai connues durant mes études : KENZA, YASMINE,*

*AMINA, YANIS et*

*Ma binôme YASMINE.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*WAHIBA*



## *Dédicace*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui tous les mots du monde ne suffisent pas pour leurs exprimer mon amour.*

*À l'homme, le plus précieux offre du dieu, qui doit ma réussite et tout mon respect, mon cher père.*

*À la femme, qui a toujours été la source d'inspiration et de courage et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse, mon adorable mère.*

*À mes chers frères : YACINE et RAYAN.*

*À mes chères sœurs : MONNA, KATIA, SONIA et SARA.*

*À mes chers amis : OUSSAMA, AMINA, KAMILIA, LETICIA*

*Et*

*Ma binôme WAHIBA.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*Yasmine*

## *Sommaire*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes autonome**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique de l'énergie éolienne .....	3
I.3 Définition de l'énergie éolienne .....	4
I.4 Principe de fonctionnement du système éolien.....	4
I.4.1 Constitution d'une éolienne.....	5
I.4.2 Différents types d'éoliennes .....	6
I.4.2.1 Éolienne à axe vertical.....	6
I.4.2.2 Éolienne à axe horizontal .....	7
I.5 Définition d'un système autonome .....	7
I.6 Différents systèmes autonome .....	8
I.6.1 Système éolien.....	8
I.6.2 Système photovoltaïque.....	9
I.6.3 Système ambarqué.....	10
I.7 Différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens autonomes .....	10
I.7.1 Génératrice à courant continu.....	10
I.7.2 Système utilisant la génératrice synchrone (GS).....	11
I.7.2.1 Génératrice synchrone à rotor bobiné.....	11
I.7.2.2 Génératrice synchrone à aimants permanent .....	12
I.7.3 Système utilisant la génératrice asynchrone (GAS) .....	12
I.7.3.1 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil .....	12
I.7.3.2 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).....	13
I.8 Machines multi-phasées.....	13
I.8.1 Caractéristiques des machines multi-phasées .....	14
I.8.1.1 Machines multi-phasées de type 1 .....	14
I.8.1.2 Machines multi-phasées de type 2 .....	14
I.8.2 Applications des machines multi-phasées .....	17
I.8.3 Avantages des machines multi-phasées .....	17

I.8.4 Inconvénients des machines multi-phasées .....	18
I.9 Conclusion .....	18

## **Chapitre II Modélisation de la machine asynchrone à double étoile**

II.1 Introduction .....	20
II.2 Description de la MASDE .....	20
II.3 Hypothèses simplificatrices .....	21
II.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double étoile .....	22
II.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile .....	22
II.5.1 Equations électriques de la MASDE .....	22
II.5.2 Equations magnétiques de la MASDE .....	24
II.5.3 Expression du couple électromagnétique .....	25
II.5.4 Expression mécanique .....	25
II.6 Modèle biphasé de la MASDE .....	26
II.6.1 Transformation de Park .....	26
II.6.2 Modèle de la MASDE selon le système d'axe (d, q) .....	27
II.6.2.1 Choix du référentiel .....	27
A. Référentiel lié au stator .....	27
B. Référentiel lié au rotor .....	28
C. Référentiel lié au champ tournant .....	28
II.6.3 Modèle biphasé de La MASDE lié au système d'axe (d, q) .....	28
II.6.4 Puissance absorbée et couple électromagnétique .....	30
II.7 Simulation et interprétation des résultats .....	31
II.8 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI .....	34
II.8.1 Modélisation de l'onduleur de tension .....	34
II.8.2 Stratégie de commande sinus-triangle .....	35
II.8.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI .....	36
II.9 Simulation et interprétation des résultats .....	36
II.10 Conclusion .....	38

## **Chapitre III Application de la commande vectorielle sur la GASDE en fonctionnement autonome**

III.1 Introduction .....	39
--------------------------	----

---

III.2 Modélisation des différentes parties du système étudié .....	39
III.2.1 Modélisation de la turbine .....	39
III.2.2 Modélisation du multiplicateur.....	40
III.2.3 Modélisation de l'arbre.....	41
III.3 Principe de la commande vectorielle .....	42
III.4 Choix d'orientation du flux .....	42
III.5 Différentes méthodes de commande vectorielle .....	43
III.5.1 Méthodes de commande vectorielle directe .....	43
III.5.2 Méthode de commande vectorielle indirecte.....	44
III.6 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse .....	44
III.6.1 Identification des paramètres des régulateurs PI.....	46
III.6.2 Application de la commande vectorielle indirecte sur la MASDE .....	48
III.7 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse .....	49
III.7.1 Identification des paramètres du régulateur de vitesse.....	50
III.8 Commande vectorielle directe avec régulation de vitesse .....	51
III.8.1 Estimateur de flux rotorique .....	51
III.8.2 Identification des paramètres du régulateur de flux .....	52
III.9 Application de la commande vectorielle de la GASDE en fonctionnement autonome ..	52
III.10 Résultats et interprétations .....	53
III.10.1 Variation de charge .....	53
III.10.1.1 Influence de la variation de charge triphasé résistive .....	53
III.10.1.2 Influence de la variation de charge triphasé inductive.....	57
III.10.2 Influence de la vitesse du vent .....	60
III.11 Conclusion.....	63
Conclusion générale et perspectives.....	64
Références bibliographiques .....	66
Annexe .....	71

## Liste des figures

<b>Fig.I.1</b>	Conversion de l'énergie dans une éolienne.....	4
<b>Fig.I.2</b>	Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne .....	5
<b>Fig.I.3</b>	Composants d'une éolienne à axe horizontal .....	6
<b>Fig.I.4</b>	Éolienne à axe verticale : turbine Darrieus, turbine Darries de type H et turbine Savonius .....	6
<b>Fig.I.5</b>	Éolienne à axe horizontal .....	7
<b>Fig.I.6</b>	Structure d'un système autonome connecté à une charge.....	8
<b>Fig.I.7</b>	Système éolien autonome.....	9
<b>Fig.I.8</b>	Schéma d'un système photovoltaïque .....	9
<b>Fig.I.9</b>	Cas d'application d'un système embarqué.....	10
<b>Fig.I.10</b>	Éolienne basée sur la génératrice à courant continu.....	11
<b>Fig.I.11</b>	Système éolien basé sur la génératrice synchrone à rotor bobiné .....	12
<b>Fig.I.12</b>	Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanent .....	12
<b>Fig.I.13</b>	Système de conversion éolien à base de génératrice asynchrone à cage d'écureuil .....	13
<b>Fig.I.14</b>	Schéma d'une génératrice asynchrone à double alimentation.....	13
<b>Fig.I.15</b>	Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases .....	17
<b>Fig.II.1</b>	Représentation des enroulements de la MASDE.....	21
<b>Fig.II.2</b>	Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q) .....	27
<b>Fig.II.3</b>	Évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux sources triphasées, suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ N.m respectivement entre les intervalles de temps [2,4] et [6,8] s .....	33
<b>Fig.II.4</b>	Schéma de l'onduleur triphasé.....	34
<b>Fig.II.5</b>	MASDE-Convertisseurs de tension à commande MLI .....	36
<b>Fig.II.6</b>	Évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivi de l'application des charges $C_r=14$ et $C_r=-14$ N.m respectivement entre les intervalles de temps [2,4] et [6,8] s.....	38
<b>Fig.III.1</b>	Modèle mécanique de la turbine éolienne.....	40
<b>Fig.III.2</b>	Modèle du multiplicateur .....	40
<b>Fig.III.3</b>	Représentation schématique du modèle de la turbine .....	41
<b>Fig.III.4</b>	Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.....	42



<b>Fig.III.5</b>	Schéma de principe de la commande à flux oriente (FOC) .....	44
<b>Fig.III.6</b>	Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI .....	47
<b>Fig.III.7</b>	Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques .....	48
<b>Fig.III.8</b>	Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE .....	49
<b>Fig.III.9</b>	Schéma de défluxage .....	49
<b>Fig.III.10</b>	Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse.....	50
<b>Fig.III.11</b>	Boucle de régulation de vitesse.....	50
<b>Fig.III.12</b>	Représentation schématique de la commande MFOC sur la MASDE .....	51
<b>Fig.III.13</b>	Boucle de régulation du flux .....	52
<b>Fig.III.14</b>	Schéma global du système étudié .....	52
<b>Fig.III.15</b>	Allure de tension du bus continu.....	54
<b>Fig.III.16</b>	Allure de la puissance électromagnétique et sa référence.....	54
<b>Fig.III.17</b>	Allure du couple électromagnétique et sa référence .....	54
<b>Fig.III.18</b>	Allure du flux rotorique direct .....	54
<b>Fig.III.19</b>	Allure du flux rotorique quadrature .....	54
<b>Fig.III.20</b>	Allure des courants statoriques des deux étoiles.....	55
<b>Fig.III.21</b>	Allure des courants de la charge .....	55
<b>Fig.III.22</b>	Allure du courants et de tension statorique de l'étoile 1 .....	56
<b>Fig.III.23</b>	Allure des courants et tensions de la charge .....	56
<b>Fig.III.24</b>	Allure de tension du bus continu.....	57
<b>Fig.III.25</b>	Allure de la puissance électromagnétique et sa référence.....	57
<b>Fig.III.26</b>	Allure du couple électromagnétique et sa référence .....	57
<b>Fig.III.27</b>	Allure du flux rotorique direct .....	58
<b>Fig.III.28</b>	Allure du flux rotorique quadrature .....	58
<b>Fig.III.29</b>	Allure des courants statoriques des deux étoiles.....	58
<b>Fig.III.30</b>	Allure des courants de la charge .....	59
<b>Fig.III.31</b>	Allure du courant et de tension statorique de l'étoile 1 .....	59
<b>Fig.III.32</b>	Allure du courant et de tension de la charge .....	60
<b>Fig.III.33</b>	Allure de profil de vent .....	61
<b>Fig.III.34</b>	Allure de tension du bus continu.....	61
<b>Fig.III.35</b>	Allure de puissance électromagnétique et sa référence.....	61
<b>Fig.III.36</b>	Allure du couple électromagnétique et sa référence .....	61
<b>Fig.III.37</b>	Allure du flux rotorique quadrature .....	62
<b>Fig.III.38</b>	Allure du flux rotorique direct .....	62

<b>Fig.III.39</b> Allure des courants statoriques des deux étoiles.....	62
<b>Fig.III.40</b> Allure du courant et de tension statorique de l'étoile 1 .....	62
<b>Fig.III.41</b> Allure des courants et tensions de la charge .....	63

## ***Liste des tableaux***

Tableau I.1 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasées de type 1). .....	15
Tableau I.2 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasées de type 2).....	16

## *Nomenclature*

### A

$a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}$	Phases de la première étoile
$a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}$	Phases de la deuxième étoile
$a_r, b_r, c_r$	Phases rotoriques

### C

$C(P)$	Fonction de transfert du PI
$C_p$	Coefficient de puissance
$C_t$	Couple aérodynamique de la turbine [N.m]
$C_{em}$	Couple électromagnétique [N.m]
$C_r$	Couple résistant (couple de la charge) [N.m]
$C_{tot}$	Couple total [N.m]
$C_g$	Couple sur l'arbre de la GASDE issu multiplicateur [N.m]
$C_{vis}$	Couple de frottement visqueux

### E

$E$	Tension continue à l'entrée de l'onduleur [V]
-----	---

### F

$f$	Fréquence de la tension de référence [Hz]
$f_p$	Fréquence de la porteuse [Hz]
$f_s$	Fréquence du réseau [Hz]
$G$	Gain du multiplicateur
$g$	Glissement

### H

$H(P)$	Fonction de transfert du premier ordre
--------	--

### I

$I_a$	Courant d'induit [A]
$i_{as1}, i_{bs1}, i_{cs1}$	Courants triphasés statoriques (étoiles 1) [A]
$i_{as2}, i_{bs2}, i_{cs2}$	Courants triphasés statoriques (étoiles 2) [A]
$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$	Courants triphasés des phases rotoriques [A]
$i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}$	Courants statoriques (étoile 1 et 2) directes et quadratiques respectivement [A]
$i_{dr}, i_{qr}$	Courants rotoriques directes et quadratiques respectivement [A]
$i_{ds1}^*, i_{qs1}^*, i_{ds2}^*, i_{qs2}^*$	Courants statoriques de référence dans les axes d et q [A]
$[i_{s1}]$	Matrice des courants statoriques de l'étoile 1 [A]
$[i_{s2}]$	Matrice des courants statoriques de l'étoile 2 [A]
$[i_r]$	Matrice des courants rotoriques [A]
$I_f$	Courant d'excitation [A]

### J

$J$	Moment d'inertie de la machine [kg. m <sup>2</sup> ]
$J_{turb}$	Moment d'inertie de la turbine [kg. m <sup>2</sup> ]
$J_t$	Inertie totale [kg. m <sup>2</sup> ]

### K

$K_f$	Coefficient de frottement visqueux [N.m.s/rd]
$K_i$	Gain integral
$K_p$	Gain proportionnel
$K_{ps1,2}, K_{is1,2}$	Gains proportionnels et intégraux des régulateurs PI des courants statoriques (étoiles 1 et 2)

### L

$L_m$	Inductance de magnétisation [H]
$L_{mr}$	Inductance mutuelle rotoriques[H]
$L_{ms}$	Inductance mutuelle statorique[H]

$L_r$	Inductance rotorique[H]
$L_s$	Inductance statorique [H]
$L_{s1}$	Inductance propre de la 1 <sup>ère</sup> étoile [H]
$L_{s2}$	Inductance propre de la 2 <sup>ème</sup> étoile [H]

### M

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

### N

$N$	Vitesse de rotation de la machine [tr/mn]
$N_s$	Vitesse de synchronisme [tr/mn]
$N_{ph}$	Nombre de phases

### P

$p$	Nombre de pair de pôles
$P_{mec}$	Puissance mécanique de la GASDE [W]
$P_{em}$	Puissance électromagnétique [W]
$PI$	Proportionnel intégral
$P_{vt}$	Puissance du vent [W]
$[P(\theta)]$	Matrice de passage de Park directe
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice de passage de Park inverse

### R

$r$	Coefficient de réglage en tension
$R$	Rayon des pales [m]
$R_{ch}$	Résistance de la charge
$R_r$	Résistance de la phase rotorique [ $\Omega$ ]
$R_s$	Résistance de la phase statorique (étoile 1,2) [ $\Omega$ ]

$[R_{s1}]$	Matrices des résistances de la phase statorique (étoile 1) [ $\Omega$ ]
$[R_{s2}]$	Matrice des résistances de la phase statorique (étoile 2) [ $\Omega$ ]
$[R_r]$	Résistance de la phase rotorique [ $\Omega$ ]

### S

S	Opération de Laplace
s	Surface balayée par les pales de la turbine

### T

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

### U

$[U]$	Vecteur de commande
$U_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur du bus continu[V]

### V

$v_{as1,2}, v_{bs1,2}, v_{cs1,2}$	Tensions triphasées statoriques (étoile 1 et 2) [V]
$v_{ar}, v_{br}, v_{cr}$	Tensions triphasés rotoriques [V]
$v_{ds1,2}, v_{qs1,2}$	Tensions statoriques (étoile 1 et 2) dans le référentiel de Park(d, q) [V]
$v_{dr}, v_{qr}$	Tensions rotoriques instantanées dans les axes d et q [V]
$v_{ds}^*, v_{qs}^*$	Tensions statoriques de référence dans les axes d et q [V]
$v_{vt}$	Vitesse du vent [m/s]
$V_{pm}$	Amplitude de la porteuse [V]
$[v_{s1}][v_{s2}][v_r]$	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques [V]
X	Entée de la boucle de régulation

### Y

Y	Sortie de la boucle de régulation
Z	Perturbation dans une boucle de régulation

$\theta$

$\theta$	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]
$\theta_r - \alpha$	Position du rotor par rapport à l'étoile 2 [rd]
$\theta_s$	Angle statorique [rd]
$\theta_e$	Angle électrique [rd]
$\theta_m$	Angle mécanique [rd]

$\Omega$

$\Omega_{mec}, \Omega_m$	Vitesse de rotation de mécanique [rad/s]
$\Omega_{mec}^*$	Vitesse mécanique de référence [rad/s]
$\Omega_r$	Vitesse de rotation du rotor [rad/s]
$\Omega_s$	Vitesse de synchronisme [rad/s]
$\Omega_t$	Vitesse de la turbine [rad/s]
$\Omega_g$	Vitesse de rotation de la génératrice [rad/s]

$\omega$

$\omega_s$	Pulsation électrique fondamental des grandeurs statoriques et du réseau [rad/s]
$\omega_r$	Pulsation électrique fondamental des grandeurs rotoriques [rad/s]
$\omega_{gl}$	Pulsation électrique fondamentale du glissement [rad/s]
$\omega_{gl}^*$	Pulsation de référence des courants rotoriques [rad/s]
$\omega_{mec}$	Vitesse de rotation du rotor [rad/s]



$\beta$ 

$\beta$  L'angle de calage des pales

 $\alpha$ 

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

 $\varphi$ 

$\varphi_{as1,2}, \varphi_{bs1,2}, \varphi_{cs1,2}$  Flux triphasés statoriques (étoiles1 et 2)

$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$  Flux rotorique de la MASDE suivant l'axe (d, q) [Wb]

$\varphi_r$  Flux rotoriques [Wb]

$\varphi_r^*$  Flux rotorique de référence [Wb]

$\varphi_{s1}, \varphi_{s2}$  Flux statoriques [Wb]

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$  Flux statorique de la MASDE suivant l'axe (d, q) [Wb]

$\varphi_f$  Flux imposé par le courant d'excitation [Wb]

$[\varphi_{s1}]$  Matrice des flux statoriques de l'étoile 1 [Wb]

$[\varphi_{s2}]$  Matrice des flux statoriques de l'étoile 2 [Wb]

$[\varphi_r]$  Matrice des flux rotoriques [Wb]

 $\tau$ 

$\tau_r$  Constante du temps rotorique [s]

 $\rho$ 

$\rho$  La densité de l'air

 $\lambda$ 

$\lambda$  Rapport de vitesse de la turbine

## ***Liste des abréviations***

AC	Courant Alternatif [A]
DC	Courant Continu [A]
FOC	Field Oriented Control (Commande à flux orienté)
GASDE	Génératrice Asynchrone à Double Etoiles
GAS	Génératrice Asynchrone
GS	Génératrice Synchrone
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MASDE	Machine Asynchrone à Double Etoile
MAS	Machine Asynchrone
MS	Machine Synchrone
MRSB	Machin Synchrone à Rotor Bobiné
M.L.I	Modulation par Largeur d'impulsion
MCC	Moteur à Courant Continu
PI	Proportionnel-Intégral

## ***Introduction générale***

Au cours des dernières années, l'énergie éolienne est devenue la ressource renouvelable la plus largement adoptée à travers le monde en raison de sa grande adaptabilité à différents terrains et environnements [Ben13], [Zam16]. Grâce à l'utilisation de cette énergie, aucune émission de gaz à effet de serre ni de polluants n'est produite. Les éoliennes modernes sont dotées d'une électronique de puissance avancée qui permet un contrôle optimal du générateur et garantit un fonctionnement compatible avec le système d'alimentation [Ana09].

Actuellement, les machines multi-phasées font l'objet d'un intérêt croissant de la part des chercheurs qui se penchent de plus en plus sur leur étude, leur analyse et leur commande. La machine asynchrone à double étoile (MASDE) est l'une des machines multi-phasées les plus répandues. Elle se compose de deux enroulements triphasés identiques disposés en étoile, décalés électriquement de  $30^\circ$  l'un par rapport à l'autre. Chacun de ces enroulements contient trois enroulements de même nombre de pôles, alimentés à la même fréquence et décalés électriquement de  $(2\pi/3)$  les uns par rapport aux autres [Sai21].

Cette machine présente plusieurs avantages significatifs, notamment la segmentation de puissance et la redondance qu'elle offre, ainsi que la réduction notable des ondulations du couple électromagnétique, des pertes rotoriques et des courants harmoniques [Ben10] [Che15].

Malgré tous ces avantages sa commande reste assez compliquée comparativement à celle de la machine à courant continu car son modèle mathématique est non linéaire dû à l'existence d'un fort couplage entre le couple et flux [Had01].

Le problème de complexité de la commande de cette machine asynchrone a ouvert la voie à plusieurs stratégies de commande. Parmi ces techniques on cite la commande vectorielle [Sai21].

La (FOC) a pour principe de suivre le comportement d'une machine à courant continu, où le couple (courant d'induit) et le flux de commande (courant d'excitation) sont découplés de manière naturelle. Ce découplage offre l'avantage d'une réponse en couple rapide. Pour assurer un réglage indépendant de la tension de la machine par rapport à la charge appliquée, nous faisons usage d'un régulateur de type PI classique [Sai21].

Notre travail se focalise sur l'objectif de contribuer au contrôle de la machine asynchrone à double étoile en mode génératrice. Où les différents systèmes autonomes, la modélisation de

la machine asynchrone à double étoile (MASDE), et l'application de la commande vectorielle sur la GASDE en fonctionnement autonome constituent les trois chapitres de ce travail de mémoire de fin d'études cités ci-dessous :

**Le premier chapitre** sera consacré à présenter des généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes électriques autonomes, qui incluent plusieurs sources de production d'énergie électrique telles que l'éolienne, le panneau photovoltaïque, et les systèmes embarqués. Nous y aborderons également des notions générales relatives aux machines multi-phasées, telles que leurs caractéristiques, leur utilisation, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

**Dans le deuxième chapitre**, nous nous pencherons sur la modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) ainsi que sur son alimentation. Nous commencerons par représenter la machine et établir son modèle dans les repères a,b,c et d, q afin de simplifier le système et faciliter son expression mathématique. Ensuite, nous étudierons le comportement de la machine lorsqu'elle est alimentée par deux sources triphasées, puis par des onduleurs de tension à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les résultats des simulations réalisées sont présentés et commentés.

**Dans le troisième chapitre** nous abordons le principe de la commande, en fournissant un rappel sur ses différentes méthodes. Nous explorons ensuite l'application de la commande vectorielle par orientation du flux (FOC : Field Oriented Control) sur la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) en fonctionnement autonome. Dans cette application, nous utilisons des redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) ainsi que des régulateurs classiques de type PI pour réguler la tension du bus continu, afin de maintenir la tension constante à la sortie des redresseurs, indépendamment de la vitesse d'entraînement et de la charge. Les résultats des simulations, dans les cas de variation de charge et de variation de vitesse seront présentés et analysés.

Nous terminant notre travail par une conclusion générale qui résumera les principales conclusions auxquelles nous allons aboutir.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes autonomes*



## I.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt grandissant pour les énergies renouvelables est motivé par la prise de conscience croissante de l'humanité face aux problèmes environnementaux [S1]. Les sources d'énergie renouvelable présentent l'avantage inestimable d'être disponibles en quantité illimitée, offrant ainsi une solution pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant l'environnement [Mah12]. Les chercheurs préconisent l'utilisation de ces ressources afin de révolutionner notre approche traditionnelle de production d'électricité, et parmi elles, on trouve l'énergie éolienne.

Dans le cas d'utilisation d'un système autonome, plusieurs machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique ainsi que la génération d'énergie électrique. Les machines électriques qui produisent de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, des dynamos ou des alternateurs, selon la technologie utilisée.

Ce chapitre présentera des généralités sur l'énergie éolienne, le système autonome et/ou système isolé, les divers types de machines présentes dans ces systèmes, ainsi que des définitions et généralités sur les générateurs éoliens, photovoltaïques, les systèmes embarqués. De plus, il abordera les caractéristiques intrinsèques des machines multi-phasées, en soulignant à la fois leurs avantages et leurs inconvénients.

## I.2 Historique de l'énergie éolienne

Depuis les temps anciens, l'énergie éolienne a été utilisée par l'homme pour différentes applications. Elle a été une des premières formes d'énergie renouvelable exploitée, en plus de l'énergie du bois. Les utilisations comprenaient la propulsion des navires, le fonctionnement des moulins à blé et le pompage de l'eau. Les premières traces de l'utilisation de l'énergie éolienne remontent à 4000 avant J.-C., lorsque les Chinois ont réussi à naviguer en mer sur des radeaux de fortune [Che15]. Les premiers moulins à vent en Europe, apparus au début du Moyen Âge, étaient utilisés pour moulinier le grain. En outre, aux Pays-Bas, ils ont également été utilisés pour drainer les lacs et les terrains inondés [Mir05]. À partir du XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent européens ont été améliorés pour augmenter la portance aérodynamique et la vitesse du rotor. Au Canada, les éoliennes ont commencé à émerger au début des années 1800 pour moulinier le grain. L'utilisation des moulins à vent s'est répandue en Europe, avec des chiffres impressionnants aux Pays-Bas et au Danemark. Cependant, leur utilisation a diminué avec de la machine à vapeur [Mir05]. L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité

a été sujette à des fluctuations en raison de divers facteurs tels que les guerres, les crises, l'évolution de la technologie, etc.

Au début du XXe siècle, les éoliennes ont dû faire face à la concurrence croissante des centrales électriques au charbon et du réseau électrique. Cependant, les pénuries de charbon et de pétrole pendant les guerres mondiales ont maintenu la demande en énergie éolienne [Che15]. En 1973, la crise pétrolière a relancé l'intérêt pour l'énergie éolienne à grande échelle, entraînant des programmes de recherche et le développement de nouveaux designs d'éoliennes plus efficaces. Les parcs éoliens ont été construits aux États-Unis et en Europe dans les années 1970. Depuis lors, l'énergie éolienne a connu une croissance significative, notamment en Europe et prévue pour représenter une part importante de la production d'électricité mondiale dans les décennies à venir [Tah20]. En 2006, l'Algérie a également adopté la technologie éolienne avec l'installation de fermes éoliennes.

### I.3 Définition de l'énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui est ensuite transformée en énergie électrique à l'aide d'une machine électrique. Bien que les coûts d'investissement soient relativement élevés, surtout pour les installations en mer (offshore), l'énergie éolienne est une ressource primaire gratuite et présente un faible impact environnemental. Cependant, dans certaines régions, les éoliennes peuvent poser quelques problèmes liés au bruit de basse fréquence, qui peut être désagréable pour les personnes vivant à proximité (Figure I.1) [Poi03].



**Fig.I.1** Conversion de l'énergie dans une éolienne [Poi03]

### I.4 Principe de fonctionnement du système éolien

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est assez simple : le vent fait tourner des pales qui à leur tour font tourner le générateur de l'éolienne. Le générateur convertit ensuite l'énergie mécanique du vent en énergie électrique éolienne. L'électricité éolienne peut être acheminée vers le réseau électrique ou stockée dans des batteries d'énergie éolienne [Tah20].

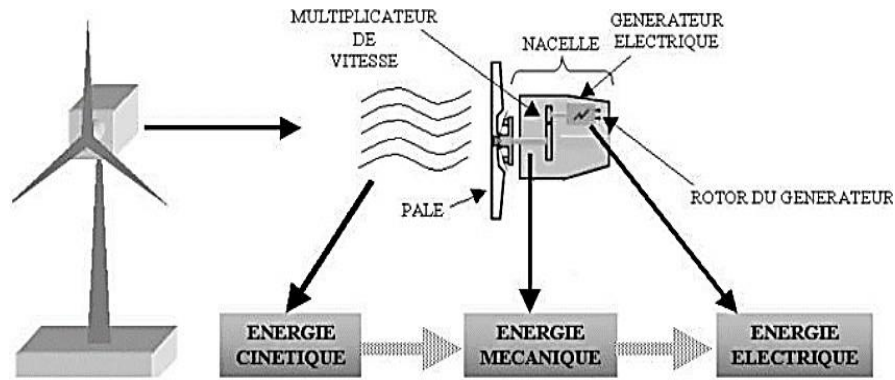


Fig.I.2 Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [Poi03]

#### I.4.1 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure I.3)

- ❖ **Le mât (La tour)** : c'est un tube d'acier. Son rôle est de supporter l'ensemble des équipements. Sa hauteur dépend essentiellement des dimensions des pâles (doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol).

Il est fixé sur une fondation au sol et pour faire face à la force du vent il doit être formé du béton qui assure les maintiens d'éolienne.

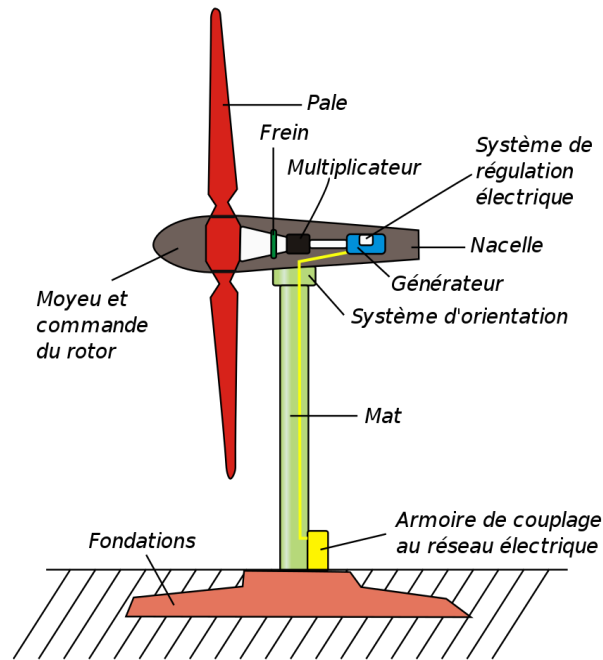
- ❖ **Le Rotor** : C'est la partie rotative de l'éolienne il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique placé en hauteur afin de capter du vent. Il se compose de :

**Pales** : Elles transfèrent la puissance du vent au moyeu du rotor.

**Moyeu** : Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle.

- ❖ **La nacelle** : elle se situe en haut du mât et comporte tous les instruments et composants nécessaires au fonctionnement du rotor : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Les systèmes électriques d'orientation des pâles (frein aérodynamique) et de la nacelle sont nécessaires pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent [Tah20].





**Fig.I.3** Composants d'une éolienne à axe horizontal [Tah20]

## I.4.2 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en générale en deux groupes selon l'axe sur lequel est montée l'hélice :

### I.4.2.1 Éolienne à axe vertical

Les pales de l'éolienne à axe vertical tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique (Figure I.4). Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée.

Elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments et peut fonctionner quel que soit le sens du vent, par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne à axe horizontal [Zou21].



**Fig.I.4** Éolienne à axe verticale : turbine Darrieus, turbine Darries de type H et turbine Savonius

### I.4.2.2 Éolienne à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, qui ont été ensuite remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion (Figure.I.5).

Ces ailes qui sont placées dans le vent ne servent pas ici à sustenter un avion mais elles servent à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe... etc. [Zou21].



**Fig.I.5** Éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 profilées aérodynamiques, elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts) [Zou21].

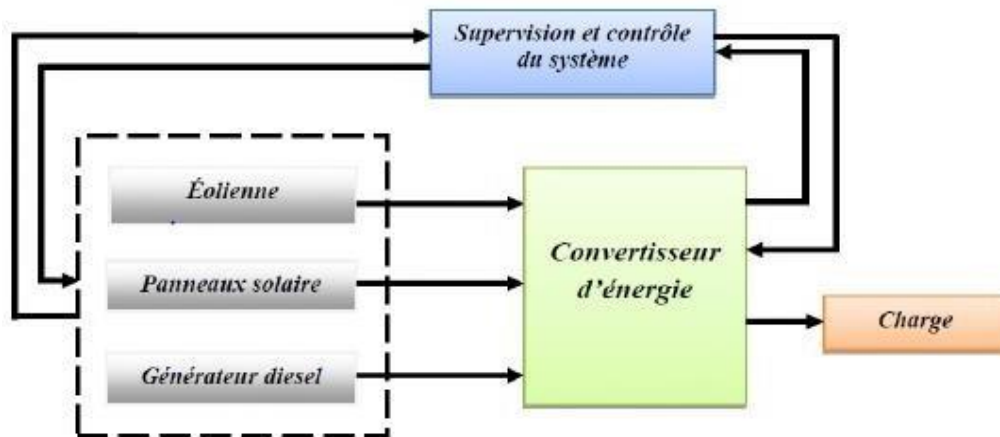
## I.5 Définition d'un système autonome

Un site isolé ou autonome est l'appellation courante pour désigner les systèmes de production d'électricité qui fournissent de l'énergie à des installations n'étant pas connectées au réseau de distribution. Cette situation peut être causée par divers facteurs tels que l'absence de réseau, des contraintes techniques et/ou financières, ou à la volonté personnelle de l'utilisateur.

Contrairement aux installations raccordées au réseau de distribution, qui bénéficient d'une puissance quasi illimitée grâce à des générateurs de forte puissance tels que les barrages hydroélectriques, les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles, et avec les pertes associées au réseau, la philosophie des systèmes autonomes est de satisfaire localement et uniquement les besoins d'un utilisateur, en prenant en compte son profil de consommation.

Que ce soit dans pays les plus reculé ou défavorisés, ou le développement et la stabilité des

réseaux sont une réelle problématique, que ce soit dans les pays industrialisés où l'architecture actuelle des réseaux ne rime pas forcément avec ... , ou que ce soit purement et simplement par conviction environnementale, les évolutions technologiques récentes ont permis de répondre à de nombreuses contraintes liées à l'autonomie énergétique, en utilisant des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique [S2].



**Fig.I.6** Structure d'un système autonome connecté à une charge

## I.6 Différents systèmes autonomes

### I.6.1 Système éolien

Dans le système d'énergie hybride, l'éolienne est l'un des générateurs d'énergie renouvelable les plus avancés sur le plan technique et économique. En général, on peut la classer en trois catégories [Fai15] :

- Système éolien sans convertisseur électronique : la plupart de ces topologies sont basées sur une machine asynchrone à cage d'écureuil. L'ajout de convertisseurs électroniques de puissance augmente la complexité et le coût du système.
- Système éolien à l'aide partielle de convertisseur électronique : cette topologie spécifique repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone à rotor bobiné, où l'enroulement peut être alimenté par un convertisseur électronique pour obtenir une plage de vitesse variable de 2% à 4%.
- Système éolien à l'aide complète du convertisseur électronique : dans cette configuration, il est possible d'utiliser soit une machine asynchrone à cage d'écureuil soit une machine synchrone.

L'application de convertisseur électronique peut s'impliquer à éliminer la boîte de vitesse.

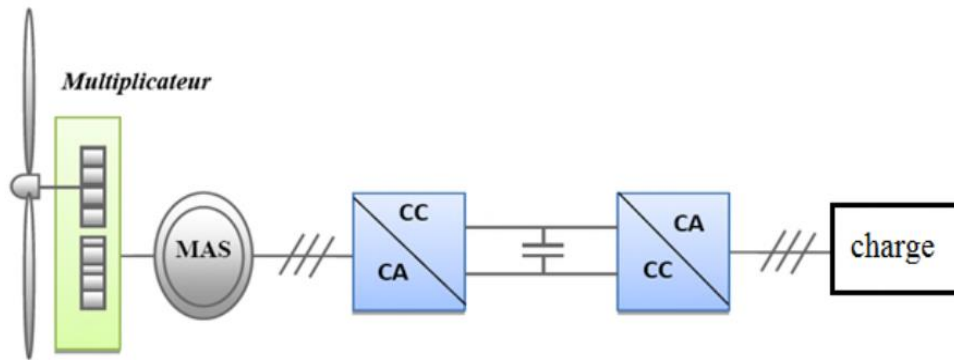


Fig.I.7 Système éolien autonome

### I.6.2 Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque assure la production et la gestion de l'énergie fournie par des capteurs photovoltaïques. L'énergie est stockée dans l'accumulateur et/ou convertie en courant alternatif en fonction du type d'application [S3].

Le fonctionnement du panneau photovoltaïque est simple : il est constitué de cellules photovoltaïques qui produisent du courant continu. Ensuite, grâce à un onduleur, ce courant est converti en courant alternatif.

Les générateurs photovoltaïques autonomes ont une utilisation dans :

- Les générateurs photovoltaïques autonomes sont utilisés dans des applications simples comme les calculettes ou les chargeurs de piles ;
- Dans les installations autonomes telles que les balises en mer ou les maisons en sites isolés, il est souvent nécessaire de stocker l'électricité à l'aide d'une batterie ;
- Ils sont également utilisés dans les installations connectées au réseau ou les centrales photovoltaïques [S4].

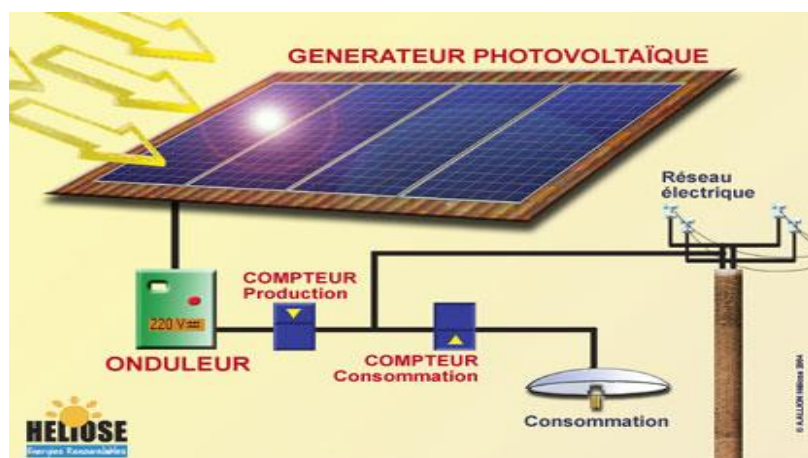
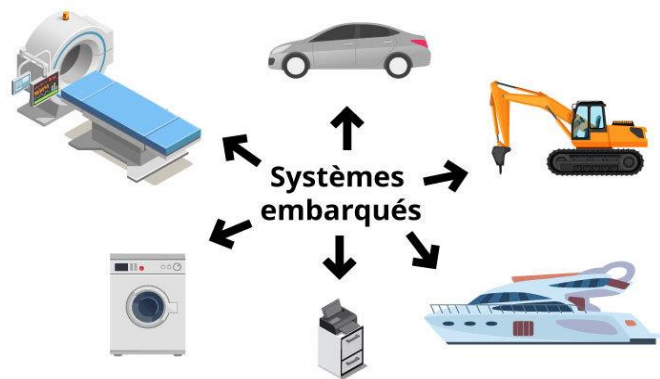


Fig.I.8 Schéma d'un système photovoltaïque [S5]

### I.6.4 Système embarqué

Les systèmes embarqués sont apparus dans les années 60 avec le système de guidage de la mission Apollo. Aujourd'hui, ils sont largement utilisés dans des domaines tels que l'électroménager, l'informatique et les transports.

Les systèmes embarqués sont des systèmes autonomes, composés à la fois de matériel et de logiciel, conçus pour exécuter des tâches spécifiques au sein de l'appareil auquel ils sont intégrés. Ils sont souvent utilisés pour des tâches en temps réel, et il n'est plus nécessaire de se rendre sur la Lune pour observer un système embarqué en action [S6].



**Fig.I.9** Cas d'application d'un système embarqué [S6]

## I.7 Différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens autonomes

Sur le marché, différentes machines électriques peuvent être utilisées comme génératrices dans les systèmes éoliens. Parmi celles-ci, trois types de machines sont couramment utilisés : la machine asynchrone à cage (MAS), la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et la machine synchrone à aimants ou à excitation (MS)[Kah20].

Le choix entre ces types de machines dépend de plusieurs facteurs, tels que la puissance requise et le mode de fonctionnement souhaité, qu'il s'agisse d'une connexion au réseau électrique ou d'un fonctionnement isolé et autonome [Maz20], [Mah12].

### I.7.1 Génératrice à courant continu

Les machines à courant continu sont essentiellement destinées pour fonctionner en moteur, la génératrice en tant que machine a été totalement remplacée par des dispositifs électroniques statiques réalisant la conversion alternative continu (redresseurs). Cependant il est intéressant de connaître le fonctionnement générateur [Ber19].

Ce type de générateurs n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieur à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure.

Ces dernières sont utilisées dans les régions éloignées où l'électricité n'est pas disponible. Une boîte de vitesse est nécessaire pour augmenter la vitesse de la turbine par un facteur de 20 à 30, ce qui permet d'utiliser une génératrice commerciale à haute vitesse, donc de dimensions réduites [Maz20].

La machine à courant continu couplée à un banc de batteries permet le stockage de l'énergie produite par l'éolienne, le banc de batterie délivre une énergie stable à la charge à courant continu même lorsque le vent est faible. Ce système nous permet d'alimenter, par exemple, quelques lampes de 12 volts et un téléviseur branché sur un convertisseur DC/AC [Ame09].

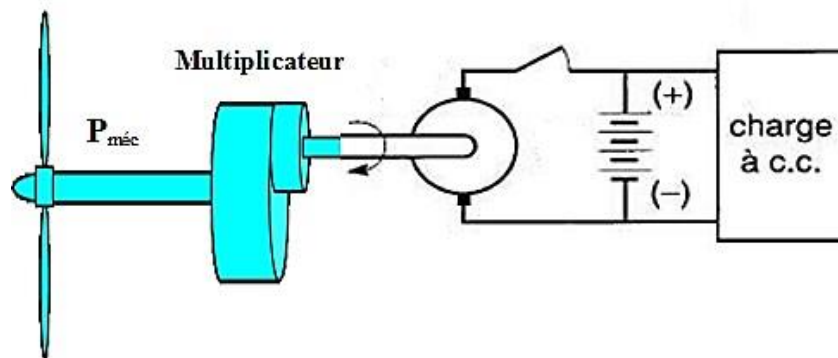


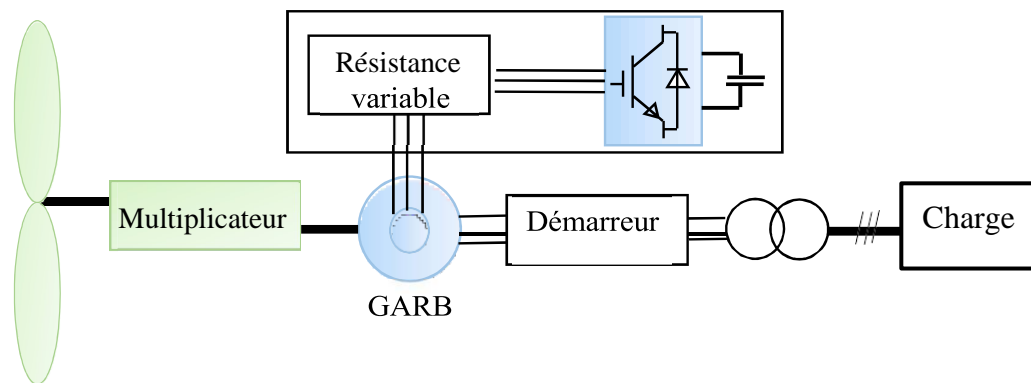
Fig.I.10 Éolienne basée sur la génératrice à courant continu [Ame09]

## I.7.2 Systèmes utilisant la génératrice synchrone (GS)

### I.7.2.1 Génératrice synchrone à rotor bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant [Lop06].

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [Idj10].



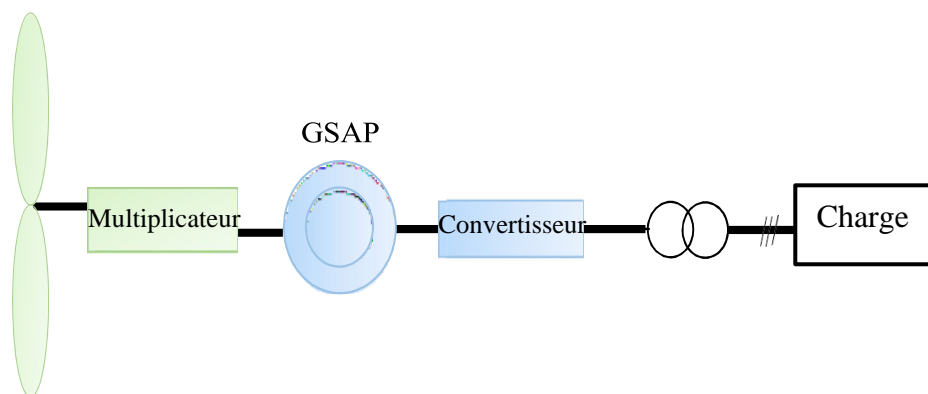
**Fig.I.11** Système éolien basé sur la génératrice synchrone à rotor bobiné [Mse19]

### I.7.2.2 Génératrice synchrone à aimants permanent

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et le non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation.

Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasée produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents [Ber19].



**Fig.I.12** Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimants permanent [Mse19]

## I.7.3 Systèmes utilisant la génératrice asynchrone (GAS)

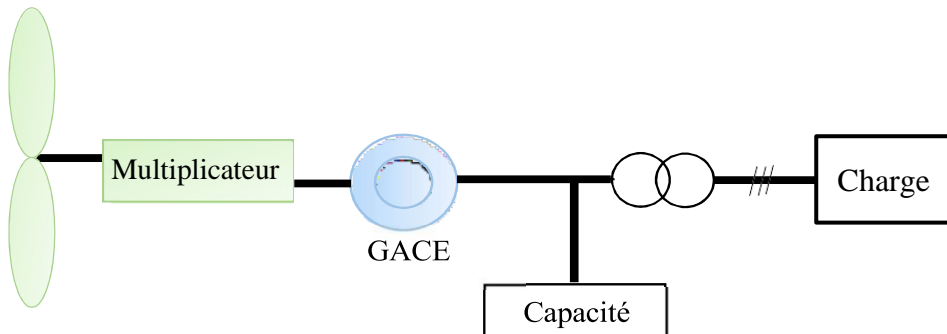
### I.7.3.1 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Les avantages des machines à cage d'écureuil résident dans leur simplicité de



construction, de manœuvre et d'entretien, leur robustesse mécanique, leur faible prix de revient et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

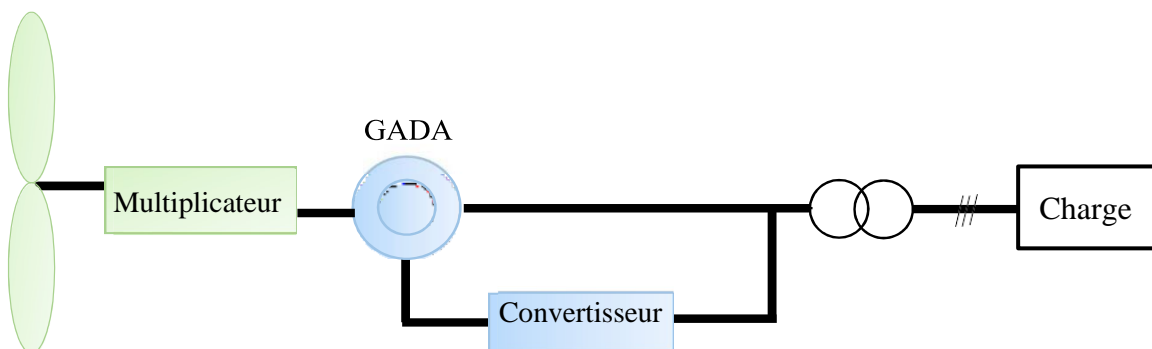
La génératrice asynchrone à cage développe une très grande sensibilité aux variations de la vitesse et de la charge lorsqu'elle est en fonctionnement autonome. Par ailleurs, cette dernière fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient [Ber19], [Mse19].



**Fig.I.13** Système de conversion éolien à base de génératrice asynchrone à cage d'écureuil

### I.7.3.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur côté GADA et convertisseur côté réseau) [Tah20].



**Fig.I.14** Schéma d'une génératrice asynchrone à double alimentation

## I.8 Machines multi-phasées

Les machines électriques à courant alternatif triphasé sont actuellement les plus courantes, mais il existe depuis longtemps un intérêt pour les machines électriques à un nombre de phases supérieur à trois. Ces dernières sont généralement appelées "machines à grand nombre de phases" ou "machines multi-phasées" [Fai15].



### I.8.1 Caractéristiques des machines multi-phasées

Les machines multi-phasées peuvent généralement être classées en deux catégories en fonction du nombre de phases statoriques, qui peut être un multiple de trois ou non. On distingue ainsi les machines multi-phasées de type 1 et les machines multi-phasées de type 2. Il convient de noter que les cas où le nombre de phases est pair sont rarement considérés, sauf s'il est également un multiple de trois [Had01], [Mer13].

#### I.8.1.1 Machines multi-phasées de type 1

Les machines multi-phasées de type 1, également connues sous le nom de "machines multi-étoiles", regroupent des machines dont le nombre de phases statoriques  $N_{ph}$  est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en  $\eta$  étoiles triphasées :

$$N_{ph} = 3 \eta \quad (\eta = 1, 2, 3, 4, 5, \dots).$$

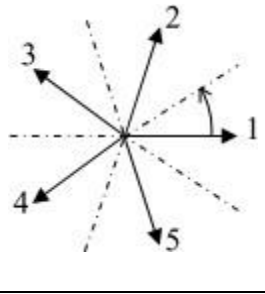
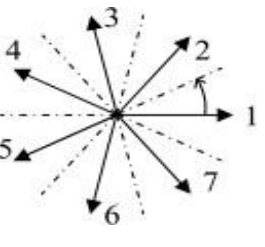
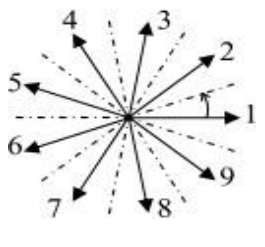
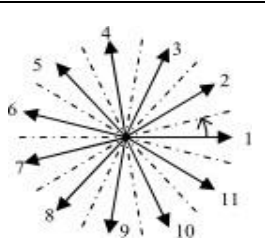
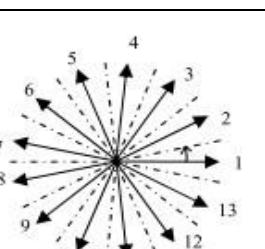
Ces machines offrent différentes configurations en fonction du nombre de phases et de l'écart angulaire  $\gamma$  entre les bobines adjacentes. Par exemple, une machine à double étoile avec six phases statoriques et un écart angulaire de  $\gamma = \pi/6$  aura des caractéristiques distinctes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de  $\gamma = \pi/3$ . On utilise un nombre équivalent de phases, noté  $N_{ph\gamma}$  pour différencier les configurations, qui est défini comme  $N_{ph\gamma} = \pi/\gamma$  [Kiy20].

#### I.8.1.2 Machines multi-phasées de type 2

Les machines de type 2 sont des machines multi-phasées avec un nombre impair de phases statoriques  $N_{ph}$ . Les  $q$  phases sont régulièrement décalées de  $2\pi/N_{ph} = 2\gamma$ . On a donc le nombre de phases égale au nombre équivalent de phases :  $N_{ph} = N_{ph\gamma} = \pi/\gamma$  [Kiy20].

Nombre de phases ( $N_{ph}$ )	Nombre équivalent de phases ( $N_{phy}$ )	Décalage angulaire ( $\gamma$ ) Degré	Représentation d'axes de bobines
3	3	60°	
6	3	60°	
6	6	30°	
9	9	20°	
12	6	30°	

**Tableau I.1** Machine multi-phasée dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multi-phasées de type 1) [Mer08]

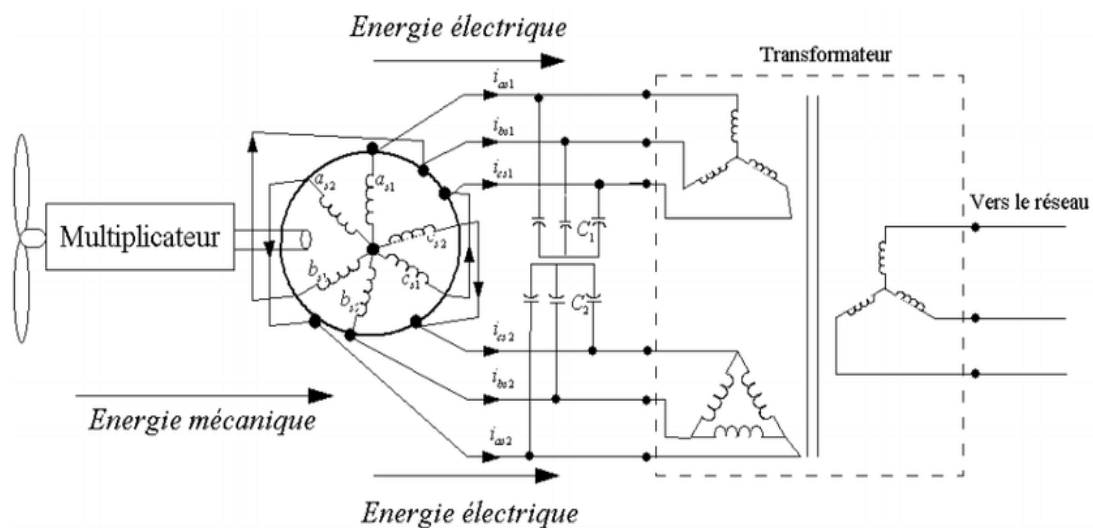
Nombre de phases ( $N_{ph}$ )	Nombre équivalent de phases ( $N_{ph\gamma}$ )	Décalage angulaire ( $\gamma$ ) Degré	Représentation des axes des bobines
5	5	36°	 A diagram showing five solid arrows representing phase axes, labeled 1 through 5, originating from a central point. The axes are spaced at 36-degree intervals. Dashed lines indicate the positions of the other four axes.
7	7	25.7°	 A diagram showing seven solid arrows representing phase axes, labeled 1 through 7, originating from a central point. The axes are spaced at 25.7-degree intervals. Dashed lines indicate the positions of the other six axes.
9	9	20°	 A diagram showing nine solid arrows representing phase axes, labeled 1 through 9, originating from a central point. The axes are spaced at 20-degree intervals. Dashed lines indicate the positions of the other eight axes.
11	11	16.3°	 A diagram showing eleven solid arrows representing phase axes, labeled 1 through 11, originating from a central point. The axes are spaced at 16.3-degree intervals. Dashed lines indicate the positions of the other ten axes.
13	13	13.8°	 A diagram showing thirteen solid arrows representing phase axes, labeled 1 through 13, originating from a central point. The axes are spaced at 13.8-degree intervals. Dashed lines indicate the positions of the other twelve axes.

**Tableau I.2** Machine multi-phasée dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multi-phasées de type 2) [Mer08]

### I.8.2 Applications des machines multi-phasées

Les machines multi-phasées sont principalement utilisées dans les applications nécessitant des puissances élevées telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins à ciment, etc. Elles sont également utilisées dans la production d'énergie éolienne où 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. Cependant, pour les petites vitesses la présence de la deuxième étoile rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de manière non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [Ker13], [Mef18].

- ❖ Une étoile de forte puissance à un grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent [Ben10].
- ❖ Une étoile de faible puissance à un faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [Ben10].



**Fig.I.15** Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases

### I.8.3 Avantages des machines multi-phasées

#### ➤ Élimination d'harmoniques d'espace

Plus la valeur de  $n_\alpha$  (nombre équivalent de phase) dont  $(n_\alpha\pi/\alpha)$  est grande, plus les rangs des premiers harmoniques d'espace existants sont élevés. Ces derniers sont ceux de rang dix-sept et dix-neuf pour la machine à neuf phases par exemple. On peut ainsi éliminer les harmoniques cinq et sept, responsables d'un creux au voisinage du septième de la vitesse synchrone dans la caractéristique couple/vitesse de certaines machines triphasées. Remarquons également que, à nombre d'encoches donné, plus le nombre de

phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôles et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental. A courant donné, on augmente donc l'amplitude du fondamental de la f.m.m, comparé au cas de la machine triphasée [Had01].

➤ **Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques**

Dans une machine triphasée l'ondulation du couple électromagnétique est principalement créée par les harmoniques cinq et sept de temps. Dans une machine à double étoile, par exemple, ces harmoniques ne créent pas de f.m.m, l'harmonique de couple de rang six est donc éliminé. Cette propriété des machines multi-phasées à éliminer les harmoniques de couple de rang faible est aussi un avantage certain. On remarque aussi que, puisque certains harmoniques de courants statoriques ne créent pas de f.m.m. les courants pouvant être induits au rotor n'existent pas pour ces harmoniques. Par conséquent, une machine multi-phasée aura pratiquement toujours moins de pertes rotoriques qu'une machine triphasée [Ham13].

➤ **Segmentation de puissance**

A puissance donnée, lorsqu'on augmente le nombre de phases, on diminue le courant par phase sans augmenter la tension par phase. La puissance totale est donc répartie sur un nombre plus important de phases, la puissance demandée par chacune d'elles est alors réduite. Ainsi, l'alimentation de la machine par onduleur peut se faire avec des composants de puissance de calibre inférieur, pouvant fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations de courants et de couple [Had01].

➤ **Amélioration de la fiabilité**

Lorsqu'une machine triphasée est alimentée par un onduleur, il se peut qu'elle entre en régime dégradé (perte de l'une des phases par défection des éléments semi-conducteurs de l'onduleur qui alimente la machine), la machine fonctionne alors uniquement sur deux phases, ce qui produit une perte de contrôle ainsi que des ondulations du couple de fortes amplitudes. Avec les machines multi-phasées, cette contrainte peut être évitée tant qu'au moins trois phases restent actives, on peut avoir jusqu'à  $(n - 3)$  phases ouvertes, sans que la connexion du neutre ne soit nécessaire [Ham13].

#### **I.8.4 Inconvénients des machines multi-phasées**

La MASDE présente des inconvénients tels que [Bou14] :

- Le nombre de semi-conducteur augmente avec le nombre de phase, ce qui peut éventuellement augmenter le cout de l'ensemble convertisseur-machine ;
- L'inconvénient majeur des machines à double étoile est l'apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé la définition des systèmes autonomes et fourni quelques descriptions des générateurs utilisés dans ces systèmes. De plus, nous avons présenté des concepts généraux et des définitions des machines électriques utilisées dans les systèmes autonomes, notamment les machines multi-phasées, leurs types et leurs domaines d'application.

Il convient de souligner que la machine asynchrone à double étoile est l'une des machines multi-phasées les plus étudiées et est considérée comme un choix optimal en termes de compromis technologique et économique.

C'est pourquoi le deuxième chapitre sera consacrer à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE).

*Chapitre II*

*Modélisation de la machine asynchrone à  
double étoile*



## II.1 Introduction

La machine asynchrone à double étoile (MASDE) est un type de machine asynchrone, largement utilisée dans l'industrie en raison de sa simplicité, sa robustesse et de son faible coût. La modélisation de la machine asynchrone à double étoile peut être complexe en raison de la répartition des enroulements et de la géométrie spécifique. Cependant, cette complexité peut être simplifiée en utilisant certaines hypothèses simplificatrices appropriées. La théorie unifiée (généralisée) des machines électriques classiques, basée sur la transformation de Park, permet de modéliser la machine de manière simplifiée en utilisant des axes perpendiculaires électriquement (axe direct et axe en quadrature) [Cre97].

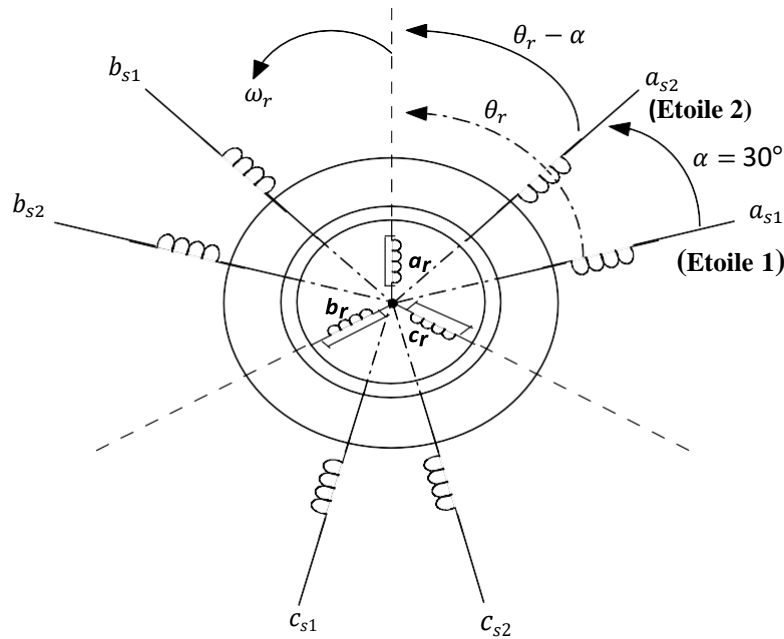
Notre étude débutera en analysant la machine asynchrone à double étoile (MASDE) alimentée par deux sources triphasées. Ensuite, nous aborderons l'alimentation de la machine par deux onduleurs de tensions à commande MLI. Dans les deux cas, nous mènerons l'étude avec un décalage angulaire  $\alpha=30^\circ$ . Enfin, nous présenterons et analyserons les résultats de simulations obtenus.

## II.2 Description de la MASDE

La MASDE est constituée d'un stator contenant deux bobinages triphasés décalés l'un par rapport à l'autre d'un angle électrique  $\alpha = 30^\circ$  et d'un rotor à cage d'écureuil. Pour simplifier l'étude, nous considérons les circuits électriques du rotor comme équivalant à un enroulement triphasé en court-circuit [S1].

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $\Omega$  différente de  $\Omega_s$ , la cage rotorique devient le siège d'un système de forces électromotrices, engendrant elles-mêmes des courants induits rotoriques qui se manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor. Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées respectivement par les indices 1 et 2 [Had01].





**Fig.II.1** Représentation des enroulements de la MASDE [Che11]

On notera par l'indice  $s_1$  pour les grandeurs relatives à la première étoile (stator1) et par l'indice  $s_2$  pour celles relatives à la deuxième étoile (stator2). Les phases de la première étoile  $a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}$  et les phases de la deuxième étoile prennent  $a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}$ , les phases rotoriques sont notées par  $a_r, b_r, c_r$ . L'angle de décalage entre les deux étoiles est  $\alpha$ .  $\theta_r$  exprime la position du rotor (phase  $a_r$ ) par rapport à l'étoile1 (phase  $a_{s1}$ ).

### II.3 Hypothèses simplificatrices

La MASDE avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre et très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte [Ham07].

Cependant, le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [Ben05], [Vid04] :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaire du courant ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, que les inductances propres sont des constantes et que les inductances mutuelles entre deux enroulements sont fonction sinusoïdale de l'angle entre leurs axes magnétiques ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire) ;

- La machine est de constitution symétrique.

## II.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double étoile

Lorsque l'enroulement 1 du stator de la machine est alimenté par des courants triphasés d'une fréquence  $f_s$ , cela engendre un champ tournant à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$ , tel que :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} [\text{rad/s}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

Les mêmes courants triphasés, mais décalés d'un angle  $\alpha$  alimentent l'enroulement 2 du même stator avec, et crée également un champ tournant à la même vitesse de synchronisme  $\omega_s$ . Ces deux champs tournants, induisent des courants dans les conducteurs du rotor, produisant des forces électromotrices qui entraînent la rotation du rotor à une vitesse inférieure à celle du synchronisme ( $\omega_r < \omega_s$ ). Les effets de l'induction statorique sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. Cela signifie que les deux champs tournants glissent par rapport au rotor, et le glissement est défini par le rapport :

$$g = \frac{\omega_{gl}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (\text{II.2})$$

## II.5 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

### II.5.1 Equations électriques de la MASDE

Les équations des tensions de la machine asynchrone à double étoile sont exprimées par la somme de la chute de tension ohmique et de la chute de tension inductive induite par le flux de chaque enroulement [Ami12], [Che11] :

- Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} v_{as1} = R_{s1}i_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = R_{s1}i_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = R_{s1}i_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

- Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} v_{as2} = R_{s2}i_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = R_{s2}i_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = R_{s2}i_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

L'équation peut être exprimée sous forme matricielle :

$$[v_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] \quad (\text{II.6})$$

$$[v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] \quad (\text{II.7})$$

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.8})$$

Avec :

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

$[v_{s1}]$  : Matrice des tensions de l'étoile 1 ;

$[v_{s2}]$  : Matrice des tensions de l'étoile 2 ;

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

$[i_{s1}]$  : Matrice des courants statoriques de l'étoile 1 ;

$[i_{s2}]$  : Matrice des courants statoriques de l'étoile 2 ;

$[i_r]$  : Matrice des courants du rotor.

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

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

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

$[\varphi_r]$  : Matrice des flux du rotor.

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

Où :

$$R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{s1}$$

$$R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{s2}$$

$$R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

### II.5.2 Equations magnétiques de la MASDE

Les équations des flux statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par [Oud04], [Mer07] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont [Che11] :

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

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

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

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

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

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

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

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

### II.5.3 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique du rotor [Kiy20].

$$C_{em} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial w}{\partial \theta_{ele}} \quad (II.10)$$

L'énergie magnétique est donnée par l'expression suivante :

$$W = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (II.11)$$

D'où l'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left( [i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t \right) \quad (II.12)$$

### II.5.4 Expression mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + K_f \Omega_{mec} \quad (II.13)$$

Avec :

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega_r}{p} \quad (\text{II.14})$$

D'autre part :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$J$ : Inertie totale des parties tournante.

$K_f$  : coefficient de frottement.

## II.6 Modèle biphasé de la MASDE

### II.6.1 Transformation de Park

La méthode de transformation de Park a pour but de remplacer les grandeurs électriques (courant, tension, flux) exprimées dans le référentiel triphasé a, b, c par des grandeurs exprimées dans le référentiel direct-quadrature-homopolaire d, q, o à l'aide de la matrice de Park  $[P(\theta)]$  [Ham13].

On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant [Ben19m].

La matrice de Park pour l'étoile 1 est donnée par :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

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

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice de Park pour le rotor est exprimée par :

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$[P(\theta_{s1})]$  : Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile 1).

$[P(\theta_{s2})]$  : Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile 2).

$[P(\theta_r)]$  : Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

### II.6.2 Modèle de la MASDE selon le système d'axe (d, q)

La figure II.2 représente le modèle de la MASDE selon le système d'axe (d, q) tournant à la vitesse  $\omega_s$ .

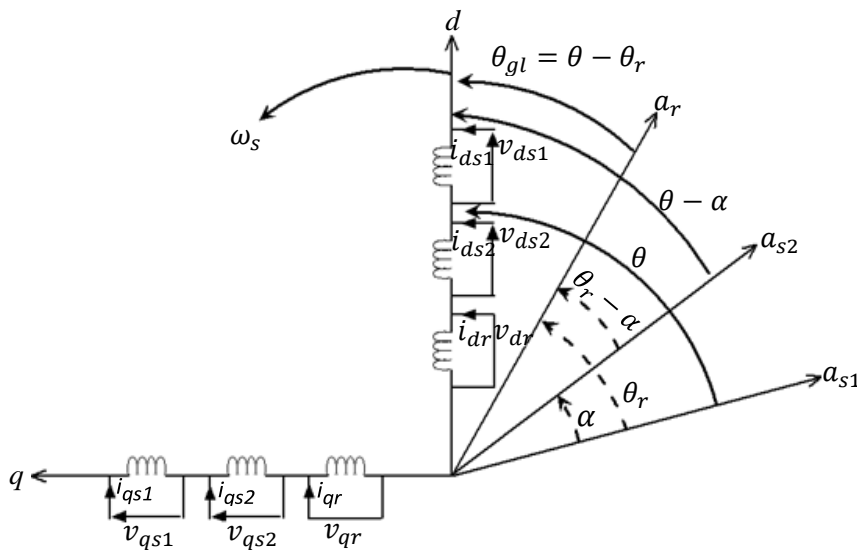


Fig.II.2 Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q)

#### II.6.2.1 Choix du référentiel

Il existe trois systèmes d'axes de coordonnées dans le plan d'axes (d, q) qui peuvent être utilisés pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double étoile.

##### A. Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, on a :

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

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

D'où :

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

Ce système d'axes offre la possibilité d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [Bou14], avec une variation importante de la vitesse de rotation.

## B. Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on a :

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_r}{dt} &= 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \frac{d\theta}{dt} = p\Omega_{mec}\end{aligned}$$

Ce système de référence permet d'analyser les régimes transitoires des machines alternatives synchrones et asynchrones présentant une asymétrie dans la connexion de leur circuit rotorique, tout en maintenant une vitesse de rotation constante [Ham14].

## C. Référentiel lié au champ tournant

Dans celui-ci, on a :

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_s - p\Omega_{mec}\end{aligned}$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques. En utilisant ce repère de coordonnées, il est possible de mettre en place une commande de vitesse, de couple, etc., étant donné que les grandeurs dans ce système sont de nature continue. C'est pourquoi ce référentiel est fréquemment utilisé [Dja13].

Dans cette étude, le modèle a été exprimé dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

### II.6.3 Modèle biphasé de La MASDE lié au système d'axe (d, q)

Pour exprimer le modèle de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) dans un référentiel biphasé lié au champ tournant, on utilise les transformations de Park qui préservent la puissance. Ces transformations sont appliquées aux grandeurs électriques telles que les tensions et les flux statoriques, nous obtenons le modèle électrique classique suivant [Che11] :

$$\left\{ \begin{aligned} v_{ds1} &= R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - \omega_s\varphi_{qs1} \\ v_{qs1} &= R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs1} + \omega_s\varphi_{ds1} \\ v_{ds2} &= R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ v_{qs2} &= R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs2} + \omega_s\varphi_{ds2} \\ v_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ v_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} + \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{aligned} \right. \quad (\text{II.19})$$



Où :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.20})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.22})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.23})$$

$$p\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.24})$$

En introduisant le système d'équations (II.21) dans (II.19) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[K][U] = [A][\dot{I}] + \omega_{gl}[Y][I] + [C][I] \quad (\text{II.25})$$

Où :

$[U] = [v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}, v_{qs2}, v_{dr}, v_{qr}]^t$  est le vecteur de la commande ;

$[I] = [i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}]^t$  est le vecteur d'état et  $[\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I]$  ;

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

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

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

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

En mettant le système (II.25) sous forme d'état, on trouve :

$$[I] = [A]^{-1}([K][U]) - \omega_{gl}[Y][I] - [C][I] \quad (\text{II.26})$$

#### II.6.4 Puissance absorbée et couple électromagnétique

En négligeant les composantes homopolaires, la puissance consommée par la MASDE dans le système d'axes (d, q) est donnée par l'expression suivante [Ami12] :

$$P_a = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant les tensions ( $v_{ds1}$ ,  $v_{qs1}$ ,  $v_{ds2}$  et  $v_{qs2}$ ) par leurs expressions dans l'équation (II.27), on trouve [Mok10] [Mer08] :

$$P_a = [R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2] + \left( \frac{d\varphi_{ds1}}{dt}i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt}i_{qs2} \right) + \omega_s(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (\text{II.28})$$

On constate que l'expression (II.28) se compose de trois termes : le premier correspond aux pertes par effet Joule, le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) et le dernier est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.29})$$

Alors, l'expression du couple électromagnétique est égale à [Ami12] :

$$C_{em} = p (\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$ ) donnés par (II.21) dans (II.30), on obtient :

$$C_{em} = p L_m [(i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}] \quad (\text{II.31})$$

À partir des équations des flux rotoriques  $\varphi_{dr}$  et  $\varphi_{qr}$  exprimées par (II.21), on tire [Ham12] :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II.32})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{II.33})$$

En introduisant (II.32) et (II.33) dans l'équation (II.31), l'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation [Had01] :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\varphi_{qr}] \quad (\text{II.34})$$

## II.7 Simulation et interprétation des résultats

Le modèle électrique de la MASDE a été implémentée dans l'environnement MATLAB/Simulink dans le but de le simuler.

Notre simulation est basée sur les paramètres donnés dans l'annexe A.1.

Après l'alimentation de la MASDE par deux sources triphasées, des charges de  $C_r = 14$  N.m et  $-14$  N.m sont appliquées à des intervalles de temps déterminés  $t = [2, 4]$  et  $[6, 8]$  s.

Les résultats de simulation donnés par la figure II.3 l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone à savoir la vitesse de rotation ( $\omega_r$ ), le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ), les courants de phases statoriques ( $i_{as1}$  et  $i_{as2}$ ), ainsi que le courant et la tension de phase 1 ( $i_{as1}$  et  $v_{as1}$ ).

Pendant la phase de démarrage et de transition, la vitesse croît de manière quasi-linéaire et atteint 310rad/s.

Au début de l'essai, le couple électromagnétique atteint une valeur maximale  $C_{em} = 57.1$  N.m, avec des oscillations qui disparaissent après 0.4s. Par la suite, il diminue presque linéairement jusqu'à atteindre sa valeur minimale  $C_{em} = 0.32$  N.m qui est causée par les frottements et se maintient à ce niveau de manière stable.

Les courants de phases statoriques ont une forme sinusoïdale, de même amplitude et sont déphasés de  $30^\circ$ .

- En appliquant la charge  $C_r = 14$  N.m couple positive (machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant  $t = 2$ s.

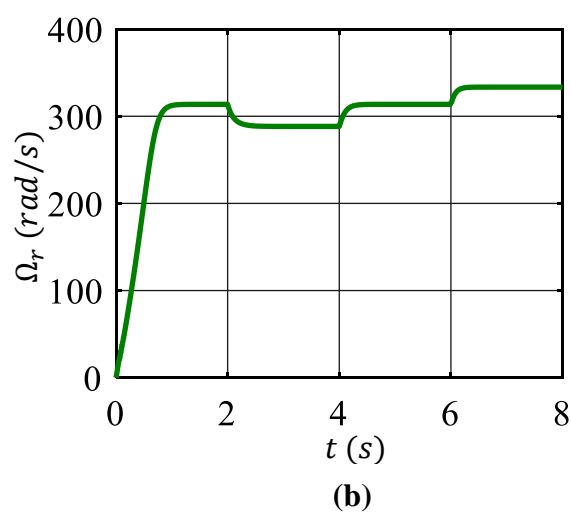
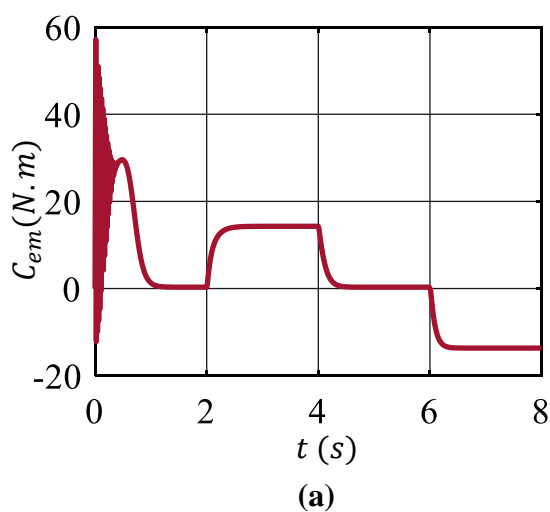
La vitesse de rotation diminue graduellement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur nominale de 288,8 rad/s et se stabilise à cette valeur. Par contre, le couple électromagnétique augmente jusqu'à  $C_{em}=14,22$  N.m, cela est dû à la compensation du couple résistant et aux pertes par frottement. Pareil pour les courants de l'étoile 1 et de l'étoile 2 qui augmentent et atteignent leur valeur crête de 5.6 A.

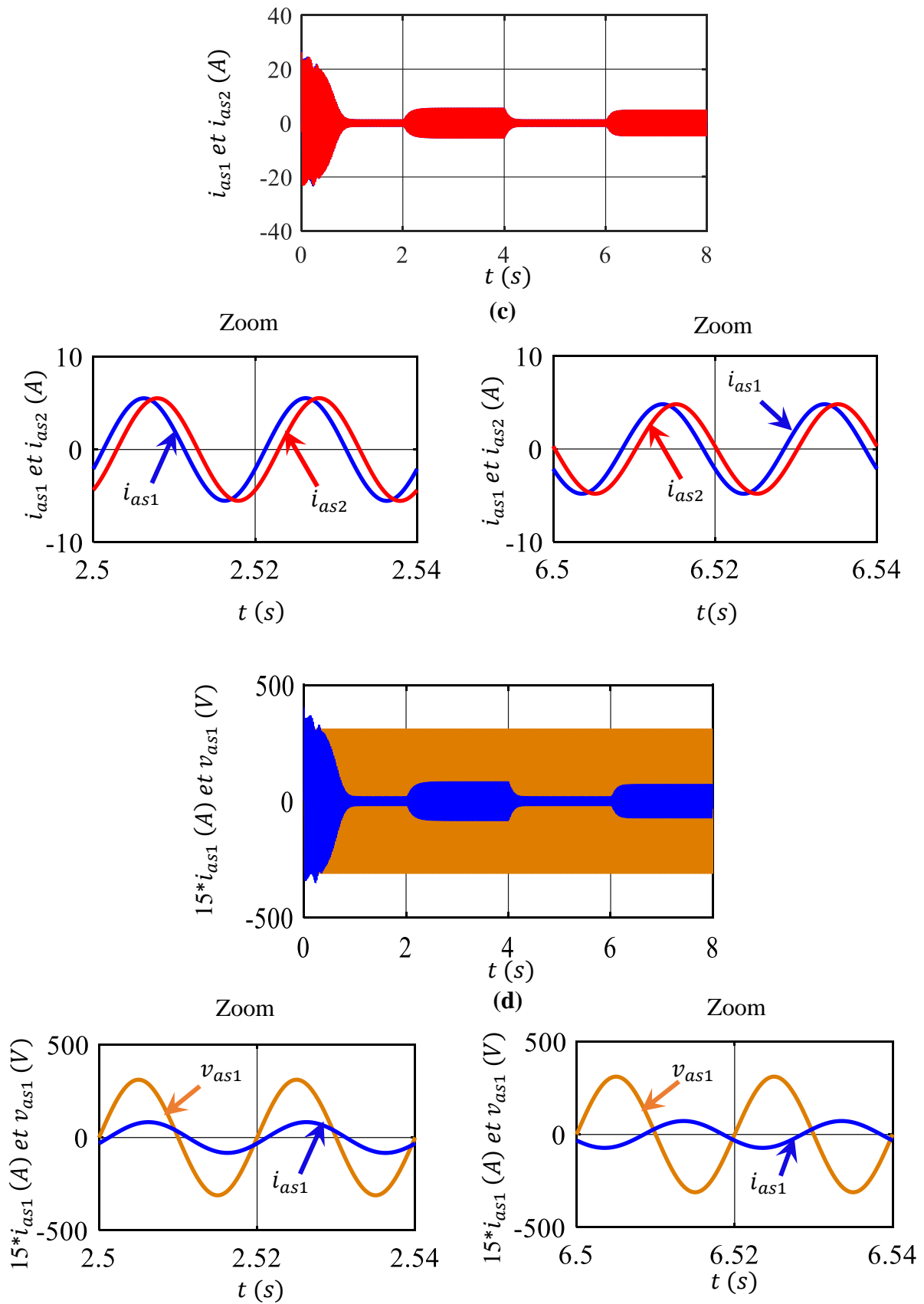
La tension d'alimentation ( $v_{as1}$ ) et le courant statorique ( $i_{as1}$ ) ont la même polarité, ce qui signifie que la machine absorbe de l'énergie active et réactive provenant de la source pour alimenter la charge et maintenir sa magnétisation. Cette absorption se fait dans un sens positif, ce qui indique que la machine fonctionne en mode moteur et non en mode génératrice.

- En appliquant la charge  $C_r = -14$  N.m couple négatif (machine en fonctionnement génératrice) à partir de l'instant  $t = 6$ s.

La vitesse de rotation s'accroît pour atteindre 333,5 rad/s et elle maintient cette vitesse stable. On observe que le couple électromagnétique diminue et prend une valeur qui correspond à  $C_{em}=13,66$  N.m.

Les courants de l'étoile 1 et de l'étoile 2 connaissent une augmentation et atteignent leurs valeurs maximales de 4.8A. Quant à la tension d'alimentation  $v_{as1}$ , et le courant statorique  $i_{as1}$ , ont un signe opposé, ce qui signifie que la machine fournit de la puissance active et absorbe une quantité de la puissance réactive pour sa magnétisation. Cela veut dire que la puissance produite est de signe négatif. Ce qui indique que la machine fonctionne en mode génératrice et non en mode moteur.





**Fig.II.3** Évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux sources triphasées, suivi de l'application des charges  $C_r=14$  et  $C_r= -14$  N.m respectivement entre les intervalles de temps  $[2,4]$  et  $[6,8]$  s

## II.8 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI

### II.8.1 Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur autonome est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance 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.

Un onduleur se compose de trois branches indépendantes. Chaque branche comprend deux paires d'interrupteurs idéaux dont les commandes sont distinctes et complémentaires. Chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode modélisée par deux états définis par une fonction de connexion logique suivante [Ami13] :

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

La figure II.4 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

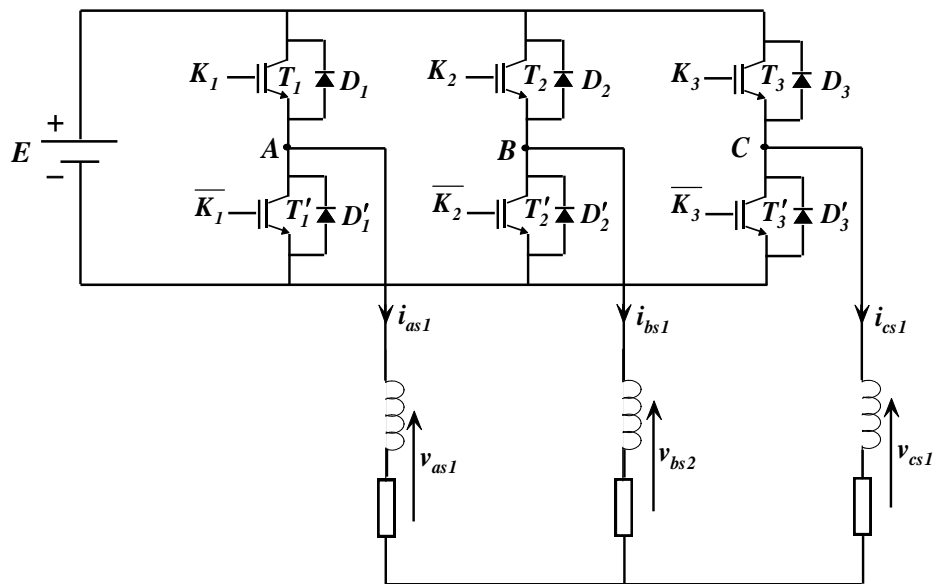


Fig.II.4 Schéma de l'onduleur triphasé

Avec :

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

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \tag{II.35}$$

$$V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \quad (\text{II.36})$$

$$V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \quad (\text{II.37})$$

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

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (\text{II.38})$$

La résolution des équations (II.35), (II.36), (II.37) et (II.38) donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

### II.8.2 Stratégie de commande sinus-triangle

La MLI sinus-triangle est effectuée en comparant une onde modulante de basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse de haute fréquence de forme triangulaire. 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 [Ami12].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations (II.41),  $(2\pi ft)$  par  $(2\pi ft - \alpha)$  et l'indice 1 par 2 :

$$\begin{cases} v_{a2}^* = v_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{b2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

On définit l'indice de modulation  $m$  comme étant le rapport de fréquence ( $f_p$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ), et le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $v_m$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ).

L'équation de la porteuse triangulaire est définie par [Ham12] :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm}[4(t/T_p) - 1] & \text{Si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm}[-4(t/T_p) + 3] & \text{Si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

### II.8.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La figure II.5 représente l'association de la MASDE-convertisseurs de tensions à commande MLI sinus-triangle.

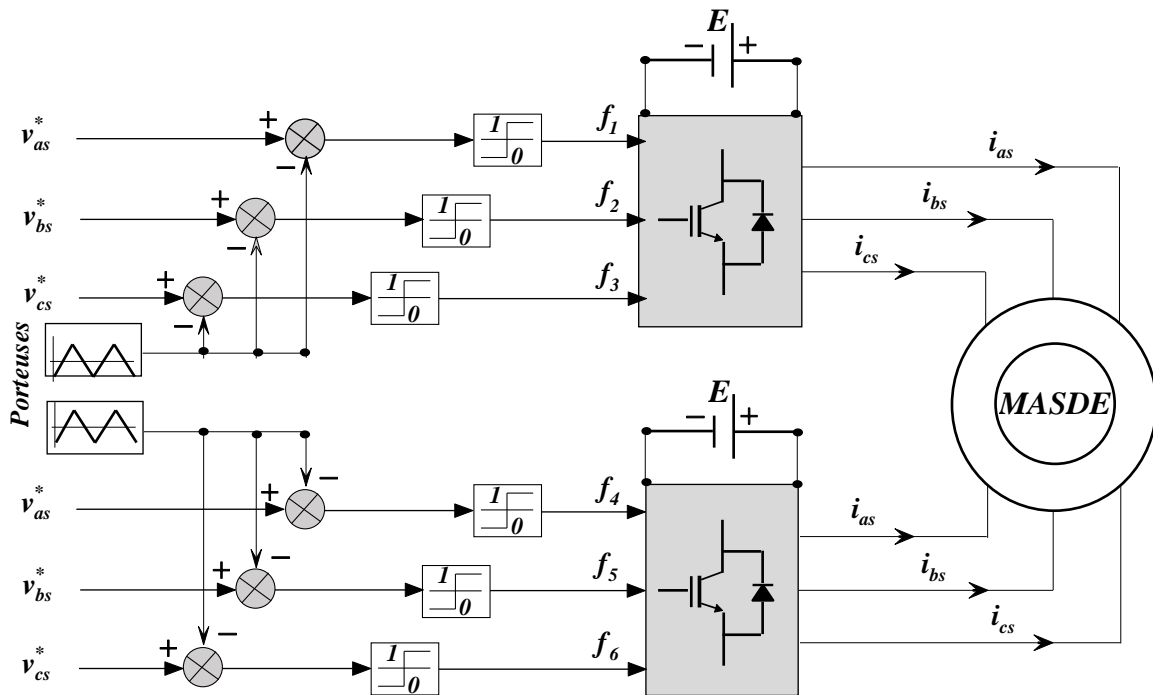


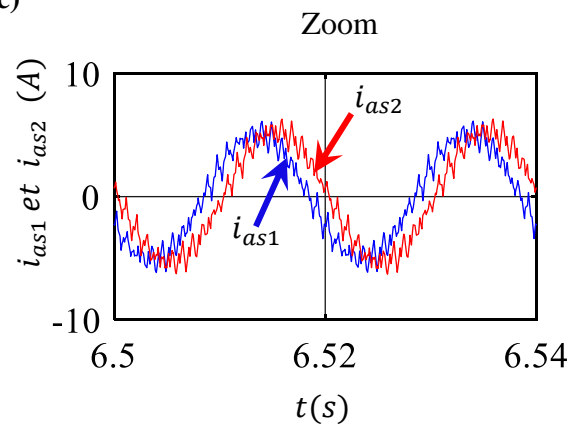
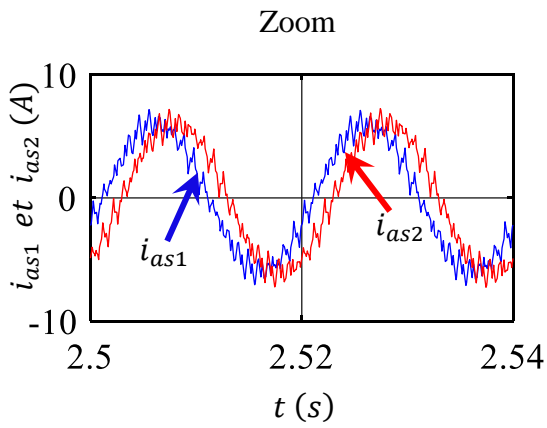
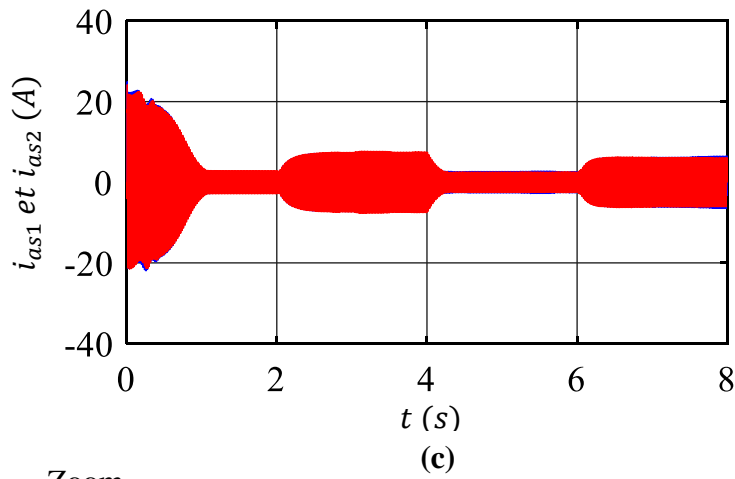
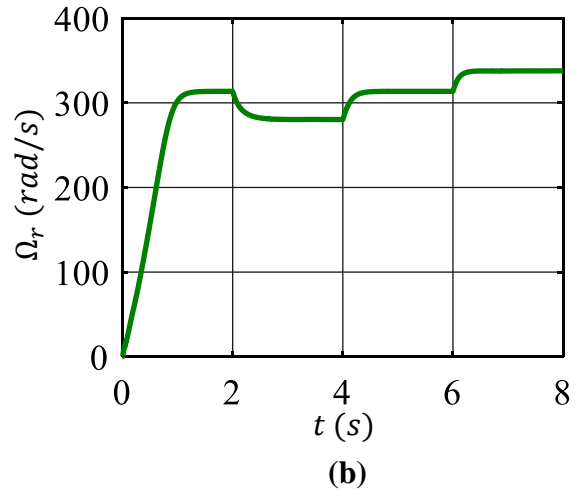
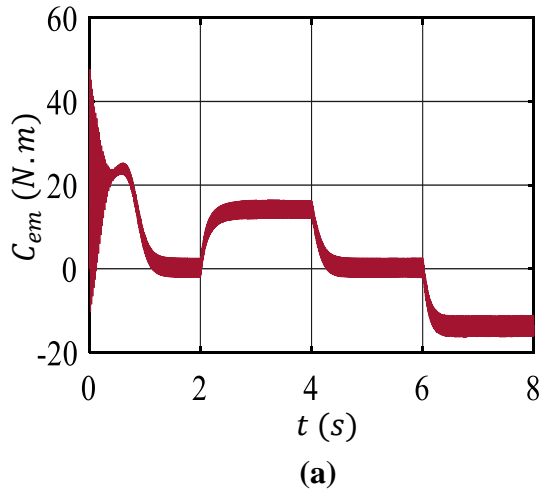
Fig.II.5 MASDE-Convertisseurs de tension à commande MLI

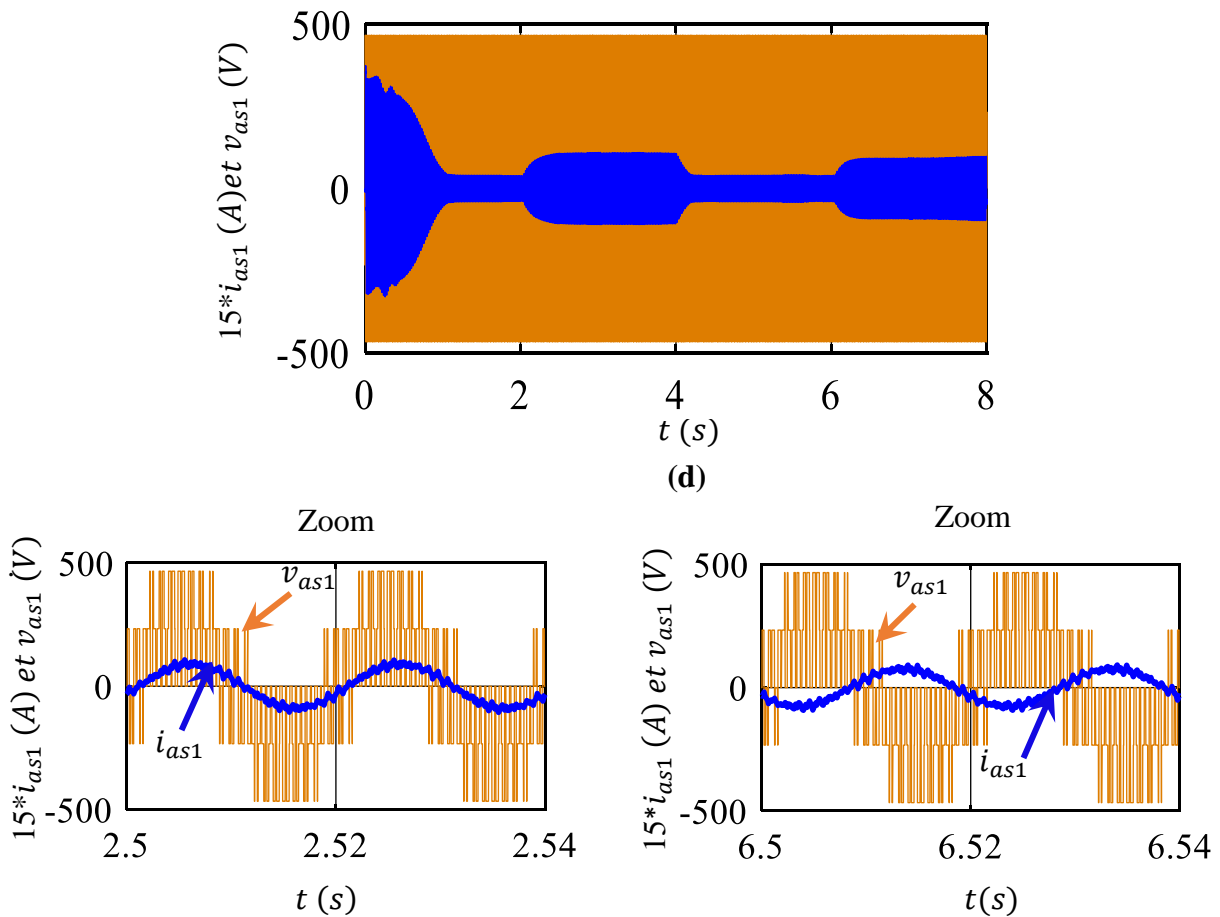
## II.9 Simulation et interprétation des résultats

La figure II.6 représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à commande MLI sinus-triangle, suivi de l'application des charges de  $C_r=14$  N.m et  $-14$  N.m à des intervalles de temps déterminés  $t= [2, 4]$  et  $[6,7]$  s.

Les résultats obtenus sont similaires aux résultats obtenus par la simulation de la machine avec l'alimentation directe au sources triphasées en termes de valeur des grandeurs telles que le courant en charge, le couple et la vitesse en régime permanent. Toutefois, l'ajout des onduleurs de tension entraîne la présence d'harmoniques dans le courant  $i_{as1}$  et le couple électromagnétique.







**Fig.II.6** Évolution des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivi de l'application des charges  $C_r=14$  et  $C_r=-14$  N.m respectivement entre les intervalles de temps  $[2,4]$  et  $[6,8]$  s

## II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle mathématique a été développé pour la MASDE en se basant sur la théorie unifiée des machines électriques. Cependant, afin de simplifier le modèle, certaines hypothèses ont été adoptées. Ensuite, un modèle Simulink de la machine a été créé sous logiciel MATLAB.

Une étude des caractéristiques de la MASDE dans différentes conditions a été menée : d'abord, lorsqu'elle est alimentée directement par deux sources triphasées, puis lorsqu'elle est soumise à des onduleurs de tensions à commande MLI, à vide et en charge.

L'introduction de la charge dans les deux types d'alimentation entraîne une modification de la vitesse (diminution en mode moteur et augmentation en mode générateur). Pour résoudre ce problème, une régulation est nécessaire. Dans le prochain chapitre, nous proposons la technique de régulation par la commande vectorielle.

## *Chapitre III*

### *Application de la commande vectorielle sur la GASDE en fonctionnement autonome*



### III.1 Introduction

Lorsqu'une machine à induction est utilisée dans un système de production d'énergie isolé, il est important de prendre en compte plusieurs facteurs. Le système doit être autonome et fournir une énergie électrique de qualité. Une MASDE peut être utilisée dans ce contexte, mais il est crucial de réguler la tension générée pour assurer l'utilisabilité de l'énergie produite. Indépendamment du point de fonctionnement, le système doit fonctionner de manière autonome, sans dépendre d'un système externe [Sai16].

Le présent chapitre consiste à concevoir un système de contrôle qui permet de réguler l'amplitude et la fréquence de la tension générée par un système de production à base de MASDE fonctionnant de façon autonome. Sur la base du modèle de la machine, une commande vectorielle basée sur l'orientation indirecte du flux rotorique est développée pour le contrôle de la tension dans un contexte où la puissance demandée par la charge et la vitesse de rotation de l'arbre sont variables. A la fin du chapitre, le système est simulé pour différents scénarios afin d'examiner ses performances dynamiques avec la stratégie de contrôle proposée.

### III.2 Modélisation des différentes parties du système étudié

#### III.2.1 Modélisation de la turbine

Un aérogénérateur est un dispositif qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. Le processus commence par la conversion d'une partie de l'énergie cinétique en énergie mécanique sur l'arbre de transmission. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à la génératrice électrique via un multiplicateur de vitesse, qui permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse de rotation. Enfin, la génératrice électrique convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, qui peut être utilisée pour alimenter des équipements électriques.

La puissance du vent ou puissance éolienne captée par les pales est exprimée par la relation suivante [Ami12] :

$$P_{vt} = \frac{1}{2} \rho S v_{vt}^3 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$\rho$  : la densité de l'air qui est égale à  $1.225 \text{ kg.m}^3$

$S$  : la surface balayée par les pales de la turbine ( $S = \pi.R$ )

La totalité de la puissance du vent disponible n'est jamais entièrement captée par les pales de l'aérogénérateur, ce qui fait que la puissance aérodynamique produite est toujours inférieure

à celle du vent. Si l'angle de calage des pales est de zéro ( $\beta = 0$ ), la puissance aérodynamique produite par rapport à la puissance du vent captée est déterminée par le coefficient de puissance de l'éolienne, telle que :

$$P_t = C_p(\lambda)P_{vt} = \frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho S v_{vt}^3 \quad (III.2)$$

Le coefficient de puissance ( $C_p$ ) représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v_{vt}} \quad (III.3)$$

L'expression du couple aérodynamique est donnée par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho S v_{vt}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (III.4)$$

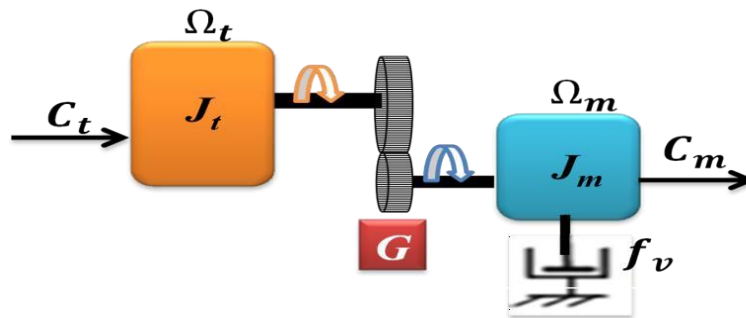


Fig.III.1 Modèle mécanique de la turbine éolienne

### III.2.2 Modélisation du multiplicateur

La vitesse mécanique de la GASDE est liée à la vitesse de la turbine par le gain du multiplicateur exprimée mathématiquement par la relation suivante [Ami12] :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (III.5)$$

De même pour les couples (sur l'arbre lent  $C_t$  et sur l'arbre rapide  $C_g$ ) qui sont reliés entre eux par le gain du multiplicateur comme l'indique la formule mathématique suivante :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (III.6)$$

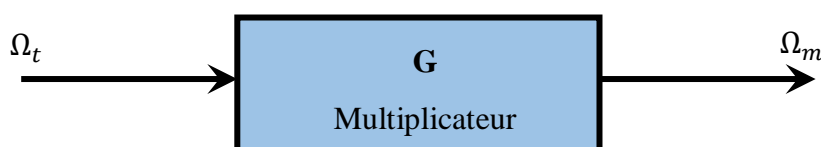


Fig.III.2 Modèle du multiplicateur

### III.2.3 Modélisation de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante [Tah20] :

$$J_t \frac{d\Omega_m}{dt} = \sum C = C_{tot} - C_{vis} \quad (III.7)$$

$J_t$  : L'inertie totale :

$$J_t = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_g \quad (III.8)$$

$C_{vis}$  : Couple de frottement visqueux

$$C_{vis} = K_f \Omega_m - C_{tot} \quad (III.9)$$

$C_{tot}$  : Couple total

L'équation de l'arbre mécanique devient alors :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + K_f \Omega_m = C_{tot} = C_g - C_{vis} \quad (III.10)$$

Le schéma bloc présenté dans la figure III.3 représente la modélisation aérodynamique et mécanique d'une turbine éolienne. Ce schéma bloc indique que la vitesse de rotation de la génératrice ( $\Omega_m$ ), qui est également la vitesse de rotation de la turbine, peut être régulée en agissant sur l'angle de calage des pales ( $\beta$ ) ou sur le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ). La vitesse du vent ( $v_{vt}$ ) est considérée comme une entrée perturbatrice pour le système.

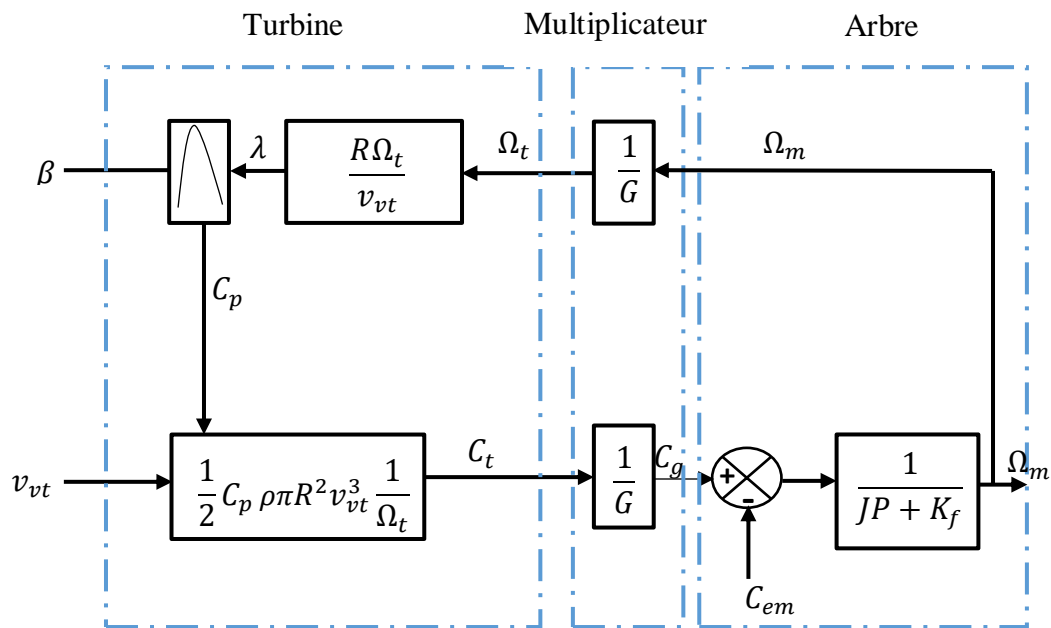


Fig.III.3 Représentation schématique du modèle de la turbine

### III.3 Principe de la commande vectorielle

L'objectif de cette commande est de rendre le comportement de la machine asynchrone à double étoile similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée sur deux aspects spécifiques (fig.III.4) [Ami12].

L'expression du couple électromagnétique de la MCC est donnée par :

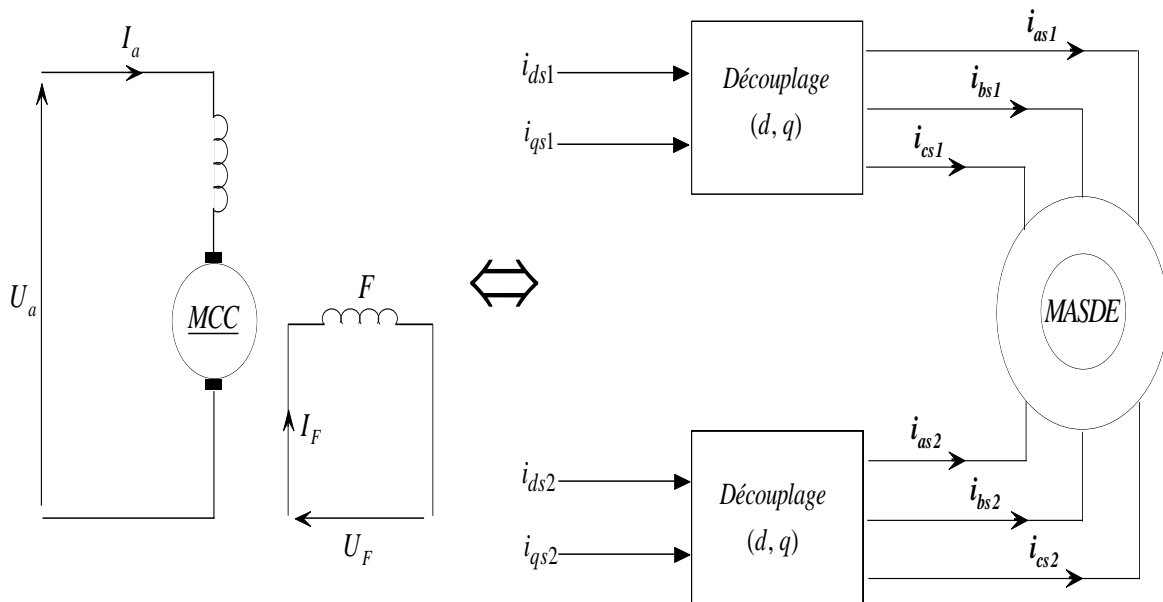
$$C_{em} = K\varphi_f I_a = K' I_f I_a \tag{III.11}$$

Avec :

$\varphi_f$  : Flux imposé par le courant d'excitation  $I_f$  ;

$I_a$  : Courant d'induit ;

$K, K'$  : Constantes.



**Fig.III.4** Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

La commande de la MASDE par orientation de flux consiste à réguler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir une loi de commande et un système d'axes assurant le découplage du flux et du couple [Tam05].

### III.4 Choix d'orientation du flux

La méthode de flux orienté repose sur l'utilisation d'un repère de référence choisi en fonction la vitesse attribuée au repère (d, q). Ainsi, les choix concernant l'alimentation et le repère ont été accomplie, dont l'alimentation en tension et le repère lié au champ tournant.

Alors, la prochaine étape du raisonnement consiste à fixer l'orientation du flux, pour laquelle trois choix sont possibles [Ham14k] :

- Orientation du flux rotorique :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \quad \text{et} \quad \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{III.12})$$

- Orientation du flux statorique :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad \text{et} \quad \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{III.13})$$

- Orientation du flux d'entrefer :

$$\varphi_{dg} = \varphi_g \quad \text{et} \quad \varphi_{qg} = 0 \quad (\text{III.14})$$

De nombreux chercheurs utilisent l'orientation du flux rotorique pour commander les machines électriques. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser cette technique d'orientation du flux rotorique ( $\varphi_{dr} = \varphi_r, \varphi_{qr} = 0$ ), car elle permet d'aboutir à un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques.

On aura la forme du couple électromagnétique suivante :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r (i_{qs1} + i_{qs2}) \\ &= K'' \varphi_r i_{qs} \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$K'' = p \frac{L_m}{L_m + L_r}, \quad \text{et} \quad i_{qs} = i_{qs1} + i_{qs2}$$

D'après l'équation (III.15), on constate que le couple électromagnétique est issu de l'interaction entre le terme de flux et le terme de courant. Cette expression est similaire au couple généré par la machine à courant continu à excitation séparée [Sin03].

### III.5 Différentes méthodes de commande vectorielle

Il est possible de distinguer deux principales méthodes de commande vectorielle en fonction de l'approche utilisée pour obtenir l'orientation du champ. Ces deux méthodes sont les suivantes :

#### III.5.1 Méthodes de commande vectorielle directe

La méthode de commande vectorielle nécessite une connaissance du module de flux et de sa position. Afin d'atteindre cet objectif, deux procédés sont couramment utilisés [Mer05] :



- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteur, l'inconvénient principal de cette technique réside dans le fait que les capteurs sont mécaniquement très fragiles ;
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

### III.5.2 Méthode de commande vectorielle indirecte

Le principe de cette méthode consiste à utiliser la position du flux rotorique plutôt que son amplitude. Cette approche, également appelée méthode indirecte, permet de se passer d'un estimateur de flux, mais elle nécessite la présence d'un capteur de position du rotor. Toutefois, cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine [Ham14].

### III.6 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. On considère comme grandeurs de références le flux rotorique  $\varphi_r^*$  et le couple  $C_{em}^*$ . Le schéma de principe de la commande à flux orienté est représenté dans la figure (III.5).



**Fig.III.5** Schéma de principe de la commande à flux orienté (FOC)

En exprimant que :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^* \tag{III.16}$$

$$\varphi_{qr} = 0 \tag{III.17}$$

En remplaçant (III.16), (III.17) dans les équations de tensions rotoriques (II.19), on obtient [Ami11] :

$$R_r \cdot i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \tag{III.18}$$

Et :

$$R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \varphi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \varphi_r^*}{R_r} \quad (\text{III.19})$$

A partir des équations (II.32) et (II.33), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_r^* - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{III.20})$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (\text{III.21})$$

En introduisant (III.20) et (III.21) dans le système d'équation des flux statorique (II.21), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 \cdot i_{ds1} + L_r B i_{ds2} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 \cdot i_{qs1} + L_r B i_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 \cdot i_{ds2} + L_r B i_{ds1} + B \cdot \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 \cdot i_{qs2} + L_r B i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec :

$$B = \frac{L_m}{L_m + L_r}$$

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

En substituant (III.18) dans (III.20), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III.23})$$

À partir de l'équation (III.21), on trouve :

$$L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) = -(L_m + L_r) i_{qr} \quad (\text{III.24})$$

En remplaçant (III.22) a (III.24) dans le système d'équations des tensions statoriques (II.19) et en introduisant l'expression (III.19), on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} S i_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1}^* = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} S i_{qs1} + \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2}^* = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} S i_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2}^* = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} S i_{qs2} + \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

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

S : Operateur de Laplace

En introduisant l'équation (III.19) dans (III.21), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r)} \frac{(i_{qs1} + i_{qs2})}{\varphi_r^*} \quad (\text{III.26})$$

À partir de la relation (III.15), on trouve :

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{p L_m \varphi_r^*} \quad (\text{III.27})$$

On remarque que dans le système d'équation électrique (III.25), les tensions statoriques ( $v_{ds1}^*$ ,  $v_{qs1}^*$ ,  $v_{ds2}^*$  et  $v_{qs2}^*$ ) influent au même temps sur les composantes des courants statoriques directes et en quadratures ( $i_{ds1}$ ,  $i_{qs1}$ ,  $i_{ds2}$  et  $i_{qs2}$ ), donc sur le flux et sur le couple. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage en définissant de nouvelles variables ( $v_{ds1r}$ ,  $v_{qs1r}$ ,  $v_{ds2r}$ ,  $v_{qs2r}$ ) n'agissant respectivement que sur ( $i_{ds1}$ ,  $i_{qs1}$ ,  $i_{ds2}$  et  $i_{qs2}$ ), tel que :

$$\begin{cases} v_{ds1r} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \cdot S i_{ds1} \\ v_{qs1r} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \cdot S i_{qs1} \\ v_{ds2r} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \cdot S i_{ds2} \\ v_{qs2r} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \cdot S i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Pour corriger l'erreur engendrée par le découplage, les tensions statoriques de référence à flux constant sont exprimées par [Che15s] :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = v_{ds1r} - v_{ds1c} \\ v_{qs1}^* = v_{qs1r} + v_{qs1c} \\ v_{ds2}^* = v_{ds2r} - v_{ds2c} \\ v_{qs2}^* = v_{qs2r} + v_{qs2c} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Où :

$$\begin{cases} v_{ds1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{qs1} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1c} = \omega_s^* (L_{s1} \cdot i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{qs2} + \tau_r \cdot \varphi_r^* \cdot \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2c} = \omega_s^* (L_{s2} \cdot i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

### III.6.1 Identification des paramètres des régulateurs PI

L'objectif de l'utilisation des régulateurs est d'améliorer la robustesse du système face aux perturbations internes ou externes.

Dans le cas de systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, on peut identifier les paramètres des régulateurs PI tels que :

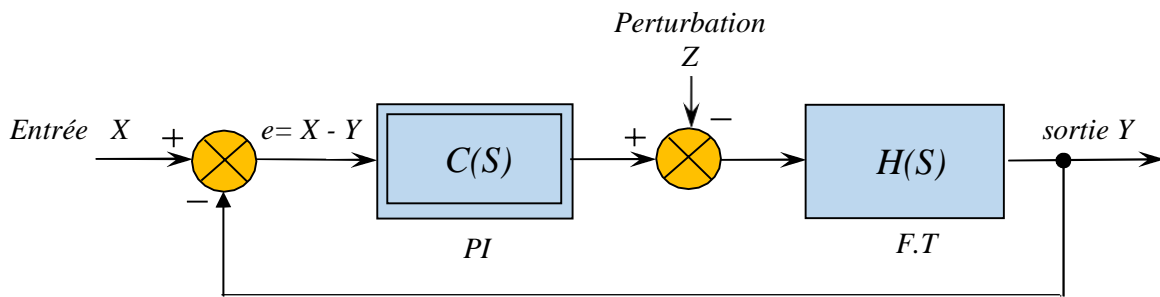
$$H(S) = \frac{1}{aS + b} \tag{III.31}$$

Se fait de manière générale comme suit :

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \tag{III.32}$$

La figure (III.6) illustre le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre avec un retour unitaire réglé par un PI.



**Fig.III.6** Schéma d'un système asservi du premier ordre réglé par un PI

Lors des étapes d'identification des paramètres des régulateurs, la perturbation est négligée.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est :

$$T(S) = C(S) H(S) = \frac{K_p S + K_i}{aS^2 + bS} \tag{III.33}$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(S) = \frac{T(S)}{1 + T(S)} = \frac{K_p S + K_i}{aS^2 + (b + K_p)S} \tag{III.34}$$

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

$$G(S) = \frac{1}{TS + 1} \tag{III.35}$$

Il suffit d'identifier (III.34) et (III.35) comme suit :

$$\frac{K_p S + K_i}{aS^2 + (b + K_p)S + K_i} = \frac{1}{TS + 1}$$

Ce qui donne :

$$K_p T S^2 + (K_i T + K_p) S + K_i = a S^2 + (b + K_p) S + K_i \quad (III.36)$$

D'où :

$$\begin{cases} K_p = \frac{a}{T} \\ K_i = \frac{b}{T} \end{cases} \quad (III.37)$$

La figure (III.7) illustre le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques (étoiles 1 et 2).

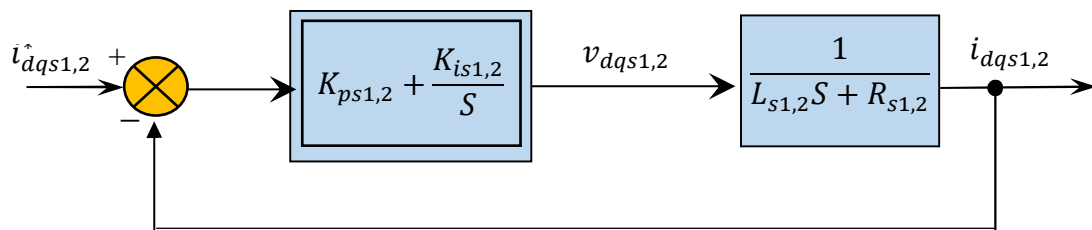


Fig.III.7 Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

Avec :

$$\begin{cases} K_{ps1} = \frac{L_{s1}}{T} \\ K_{is1} = \frac{R_{s1}}{T} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} K_{ps2} = \frac{L_{s2}}{T} \\ K_{is2} = \frac{R_{s2}}{T} \end{cases} \quad (III.38)$$

Pour avoir une dynamique du processus rapide, on prend  $T = \frac{\tau_r}{6}$ , avec  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  représente la constante de temps électrique (rotorique) du système.

### III.6.2 Application de la commande vectorielle indirecte sur la MASDE

L'application de la commande vectorielle indirecte sans régulation de vitesse sur une machine asynchrone à double étoile est représentée sur la figure (III.8).

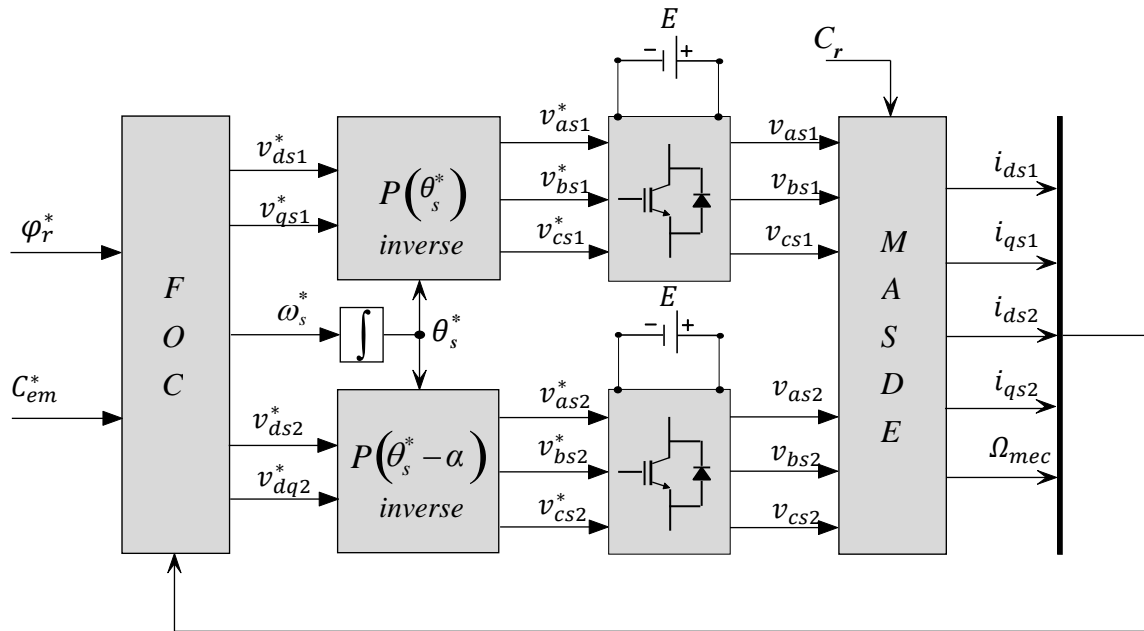


Fig.III.8 Représentation schématique de la commande FOC sur la MASDE

### II.7 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode repose sur la détermination directe de la composante du flux rotorique à partir de la vitesse de rotation du rotor à l'aide d'un capteur dédié, Cette opération est effectuée à l'aide d'un bloc de défluxage, qui est défini par la fonction non linéaire suivante [Bou14] :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n & \text{si} & |\Omega_r| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \varphi_n \frac{\Omega_n}{|\Omega_r|} & \text{si} & |\Omega_r| > \Omega_n \end{cases} \quad \text{(III.39)}$$

Et schématisé par la figure (III.9) :

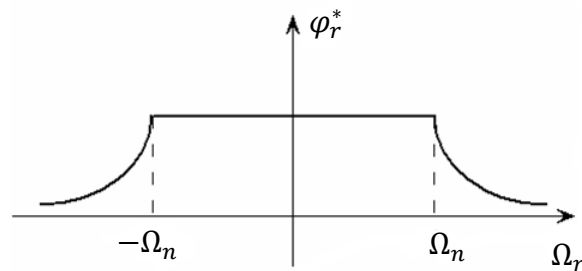


Fig.III.9 Schéma de défluxage

Dans la plupart des cas, le flux est maintenu à une valeur nominale constante pour des vitesses de rotation du rotor inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine. Cependant, pour des vitesses supérieures, le flux est réduit pour éviter la saturation magnétique

et limiter la tension aux bornes de la machine. Le schéma de réglage de la vitesse de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) est donné par la figure (III.10).

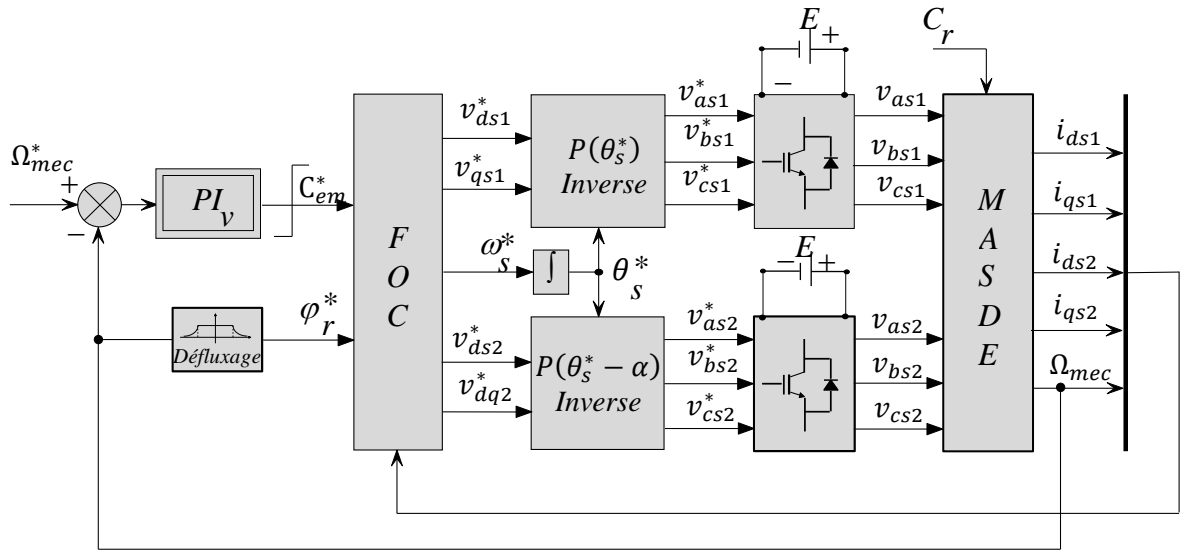


Fig.III.10 Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse

### III.7.1 Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de la vitesse est donné par la figure (III.11) :

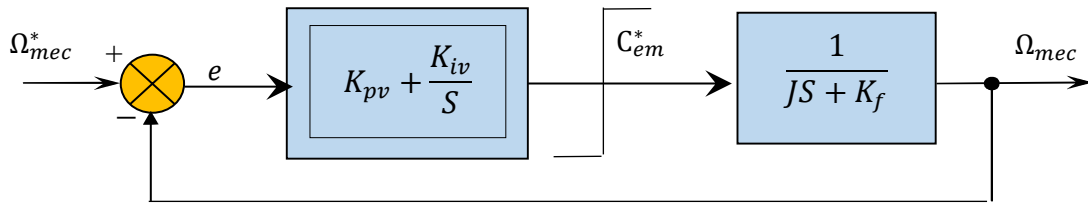


Fig.III.11 Boucle de régulation de vitesse

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{J}{\tau} \\ K_{iv} = \frac{K_f}{\tau} \end{cases} \quad (III.40)$$

On prend :  $T = \frac{\tau_r}{3}$

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

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* & \text{si } |C_{em}^*| \leq C_{em}^{Max} \\ C_{em}^{Max} \text{ sign}(C_{em}^*) & \text{si } |C_{em}^*| \geq C_{em}^{Max} \end{cases} \quad (III.41)$$

### III.8 Commande vectorielle directe avec régulation de vitesse

La régulation du flux est réalisée à l'aide d'une boucle de contre-réaction et estime à partir des courants statoriques et de la pulsation des courants rotoriques de la commande.

Dans cette application, le bloc de découplage (FOC) est modifié. La figure (III.12) schématise le principe de la commande à flux orienté modifié (MFOC).

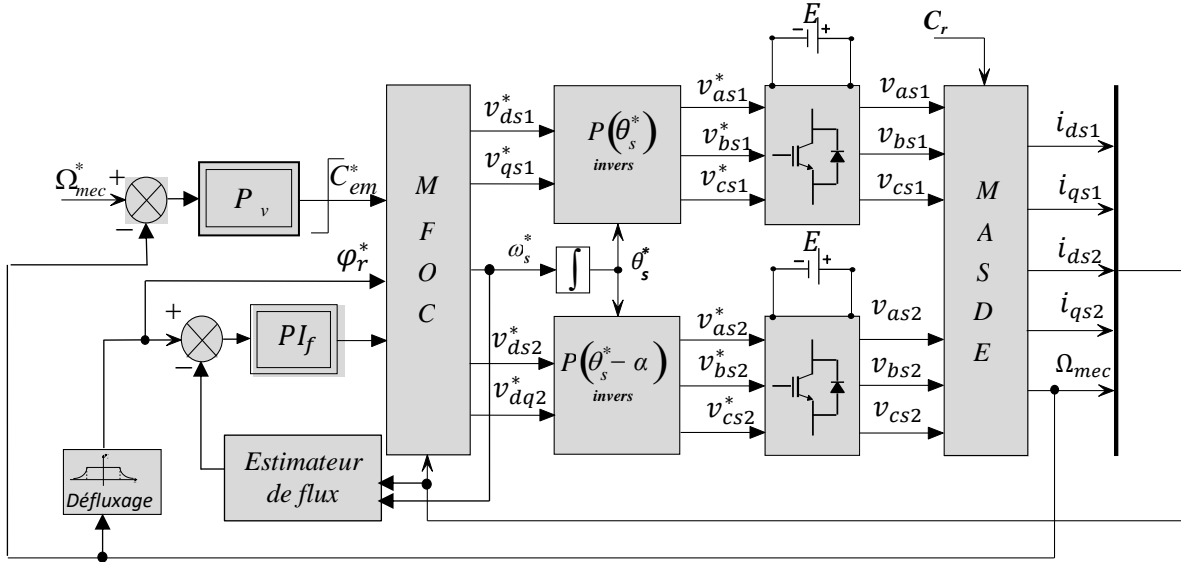


Fig.III.12 Représentation schématique de la commande MFOC sur la MASDE

#### III.8.1 Estimateur de flux rotorique

À partir des équations des tensions rotoriques (II.19), on tire :

$$\frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -R_r i_{dr} + \omega_{gl} \varphi_{qr} \quad (III.42)$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -R_r i_{qr} - \omega_{gl} \varphi_{dr} \quad (III.43)$$

Et des équations des flux rotoriques (II.21), on obtient :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r + L_m} [\varphi_{drest} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (III.44)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r + L_m} [\varphi_{qrest} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (III.45)$$

En remplaçant (III.43) dans (III.40) et (III.44) dans (III.41), on trouve :

$$\frac{d}{dt} \varphi_{drest} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2}) - \frac{R_r}{L_r + L_m} \varphi_{drest} + \omega_{gl} \varphi_{qrest} \quad (III.46)$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{qrest} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \frac{R_r}{L_r + L_m} \varphi_{qrest} - \omega_{gl} \varphi_{drest} \quad (III.47)$$

D'où, le module du flux rotorique estimé est :



$$\varphi_{rest} = \sqrt{\varphi_{drest}^2 + \varphi_{qrest}^2} \tag{III.48}$$

### III.8.2 Identification des paramètres du régulateur de flux

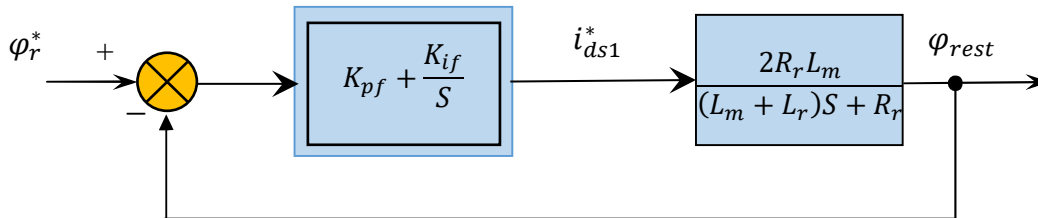


Fig.III.13 Boucle de régulation du flux

L'identification de ce dernier, nous donne :

$$\begin{cases} K_{pf} = (L_r + L_m)/(2R_r L_m T) \\ K_{if} = 1/(2L_m T) \end{cases} \tag{III.49}$$

On prend  $T = \tau_r$

### III.9 Application de la commande vectorielle de la GASDE en fonctionnement autonome

La figure (III.14) illustre la représentation schématique globale du système

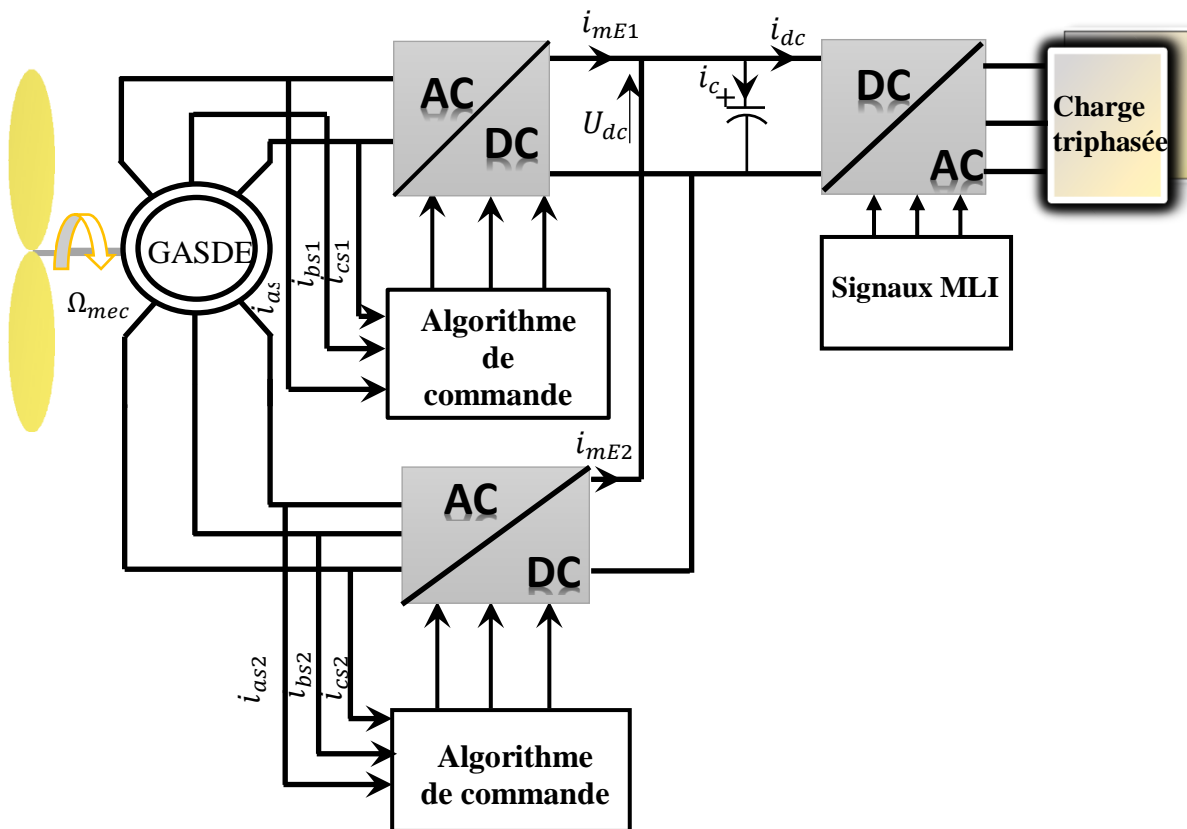


Fig.III.14 Schéma global du système étudié

### III.10 Résultats et interprétations

Les résultats obtenus à partir de la commande indirecte avec régulation de vitesse de la GASDE ont été évalués au cours de deux tests distincts, Dans le cadre d'une analyse des performances de la commande. Le premier test consiste à fixer la vitesse et varier la charge (charge résistive et charge inductive). Contrairement au premier test, nous avons procédé dans le deuxième test à varier la vitesse (insertion d'un profil de vent) et fixer la charge.

Notre simulation est basée sur les paramètres donnés dans l'annexe A.1.

#### III.10.1 Variation de charge

##### III.10.1.1 Influence de la variation de charge triphasé résistive

Nous avons fixé la tension de référence à 600 V et la vitesse à 314 rad/s.

L'amorçage de la génératrice ayant eu lieu à vide, Pendant l'intervalle de temps de [0 2] s, nous avons opté à charger initialement une capacité de valeur de 100 $\mu$ F, afin de fournir de l'énergie réactive nécessaire pour l'amorçage.

- A l'instant  $t=2s$ , nous insérons une charge triphasé résistive de 50% de la valeur nominale qui est de  $R=37\Omega$ .
- A l'instant  $t=6s$ , nous insérons une autre charge de 100% de la valeur nominale.

Les résultats de simulation nous montrent que :

La tension du bus continue suit correctement sa référence comme illustrer dans la figure III.15.

Le flux rotorique direct demeure stable et égale à (1 Wb) quel que soit la variation de la charge, tandis que le flux en quadrature s'annule en prenant la valeur de (0 Wb), comme montrer dans les figures III.18 et III.19 respectivement. Ceci indique que les flux rotoriques n'ont pas été affecté par ces variations. On dit donc que le découplage est parfait.

En revanche, la puissance et le couple électromagnétique suivent parfaitement leurs références et atteignent leurs valeurs nominales. Toutefois, la variation de la charge a influencé sur ces deux grandeurs comme indiquer dans les figures III.16 et III.17 respectivement.

D'après la figure III.20, les courants statorique  $i_{as1}$  et  $i_{as2}$  donnent lieu à une forme sinusoïdale avec une présence des harmoniques dus aux deux onduleurs de tension MLI. Ces derniers présentent la même amplitude et maintient toujours un décalage de 30° entre eux.

Le courant statorique est déphasé d'environ 180° par rapport à la tension statorique, ce qui signifie que le produit de ces deux grandeurs est de signe négatif (la génératrice fournit de la puissance active mais consomme une partie de la puissance réactive), voir figure III.22.

La tension et le courant de charge sont en phases (déphasage  $0^\circ$ ), ce qui montre que la charge insérée est purement résistive, voir figure III.23.

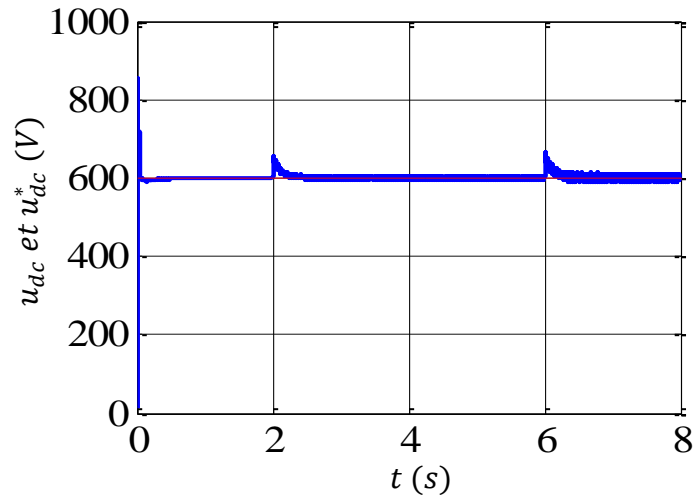


Fig.III.15 Allure de tension du bus continu

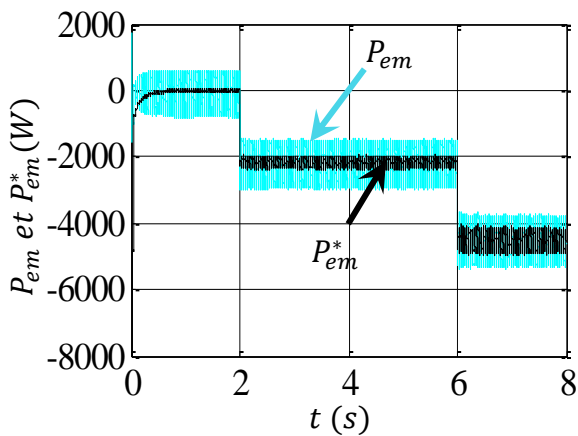


Fig.III.16 Allure de la puissance électromagnétique et sa référence

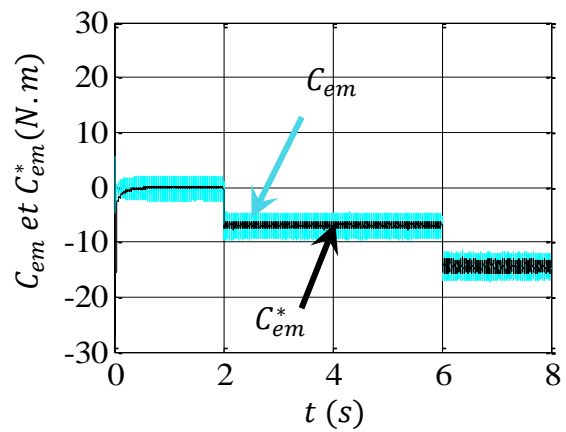


Fig.III.17 Allure du couple électromagnétique et sa référence

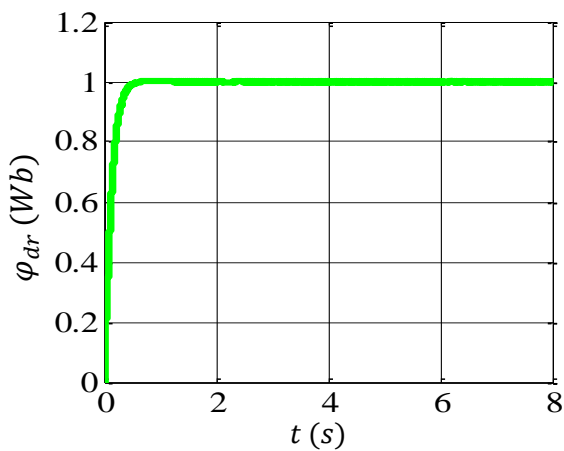


Fig.III.18 Allure du flux rotorique direct

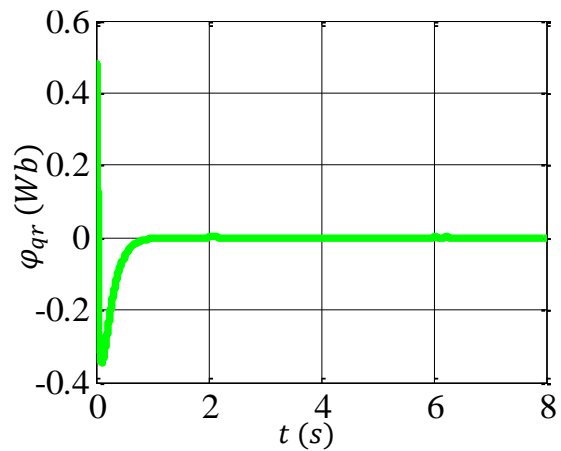


Fig.III.19 Allure du flux rotorique quadrature

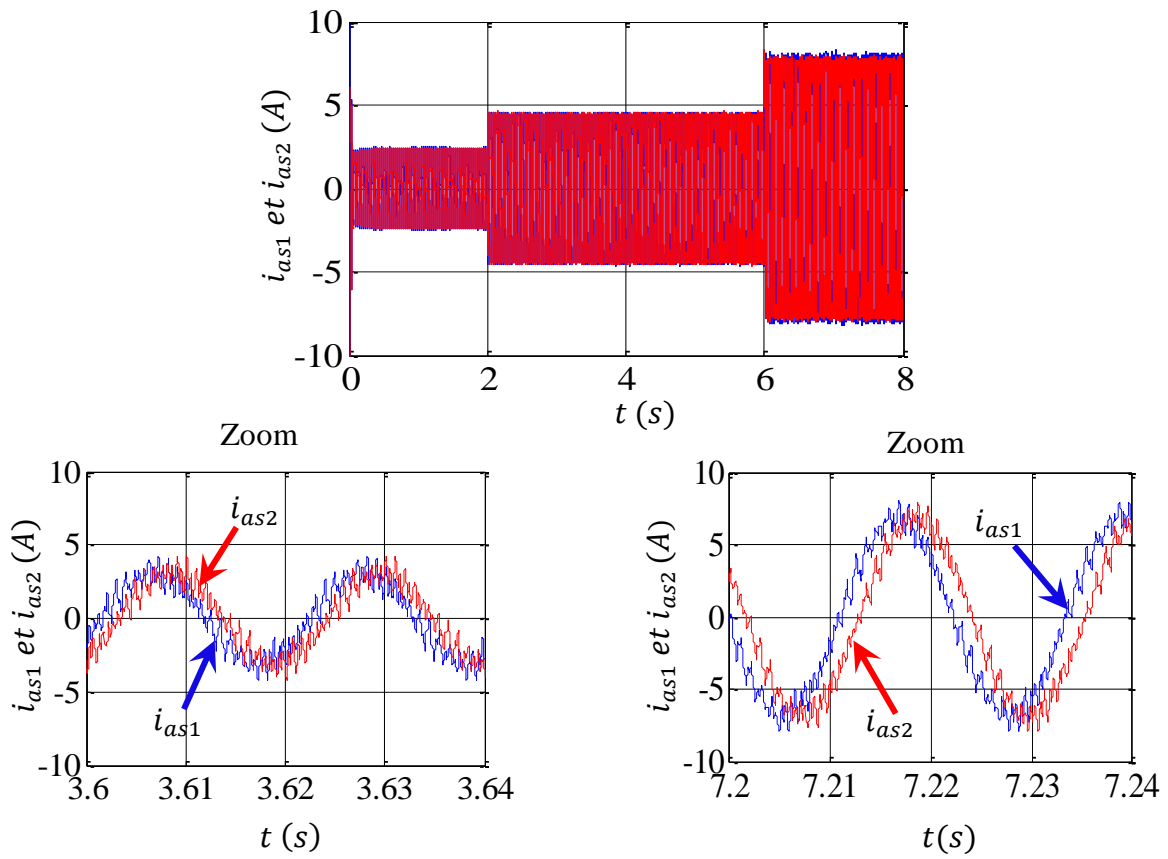


Fig.III.20 Allure des courants statoriques des deux étoiles

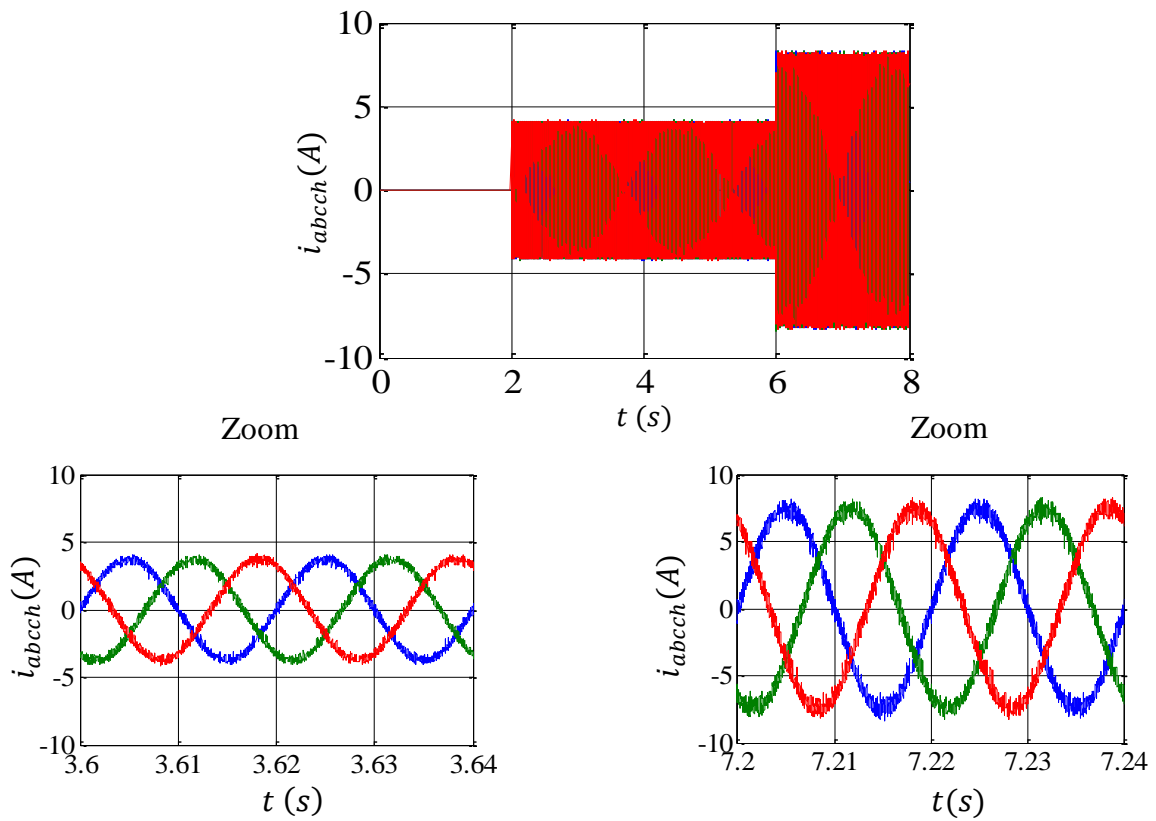


Fig.III.21 Allure des courants de la charge

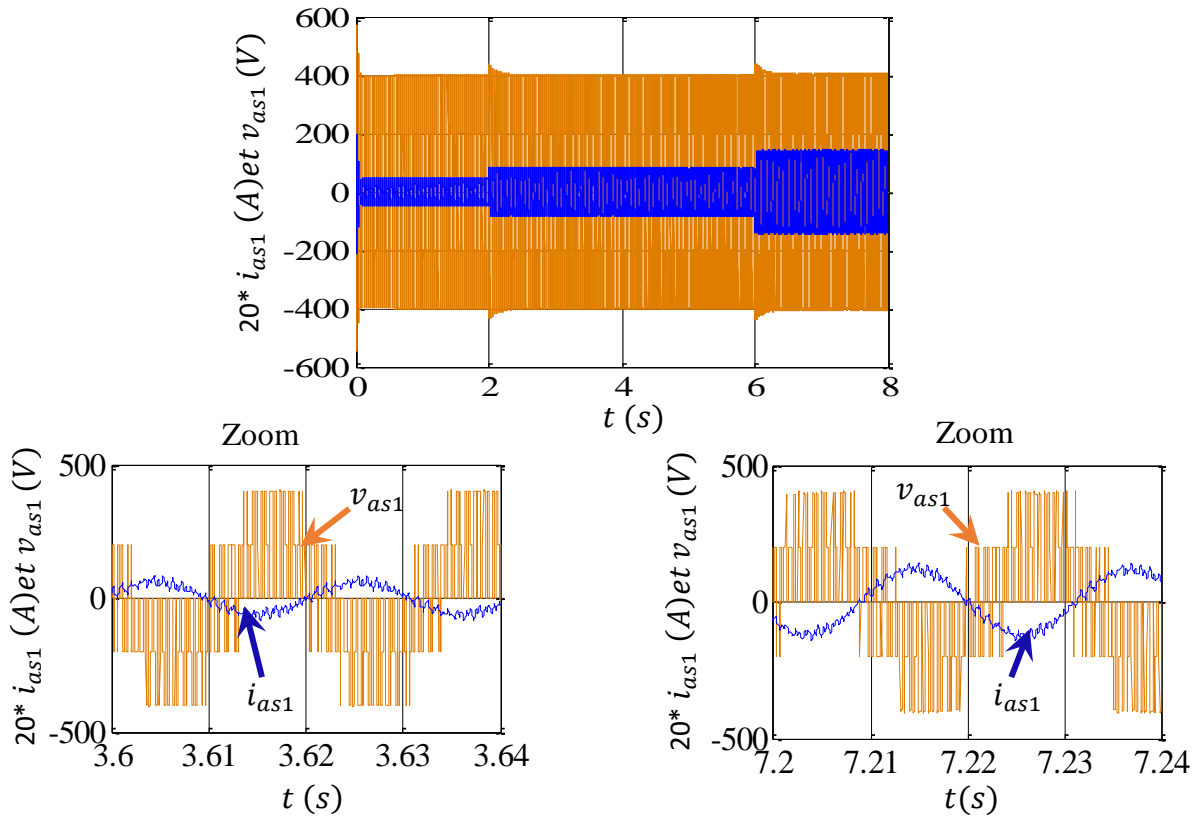


Fig.III.22 Allure du courant et de tension statorique de l'étoile 1

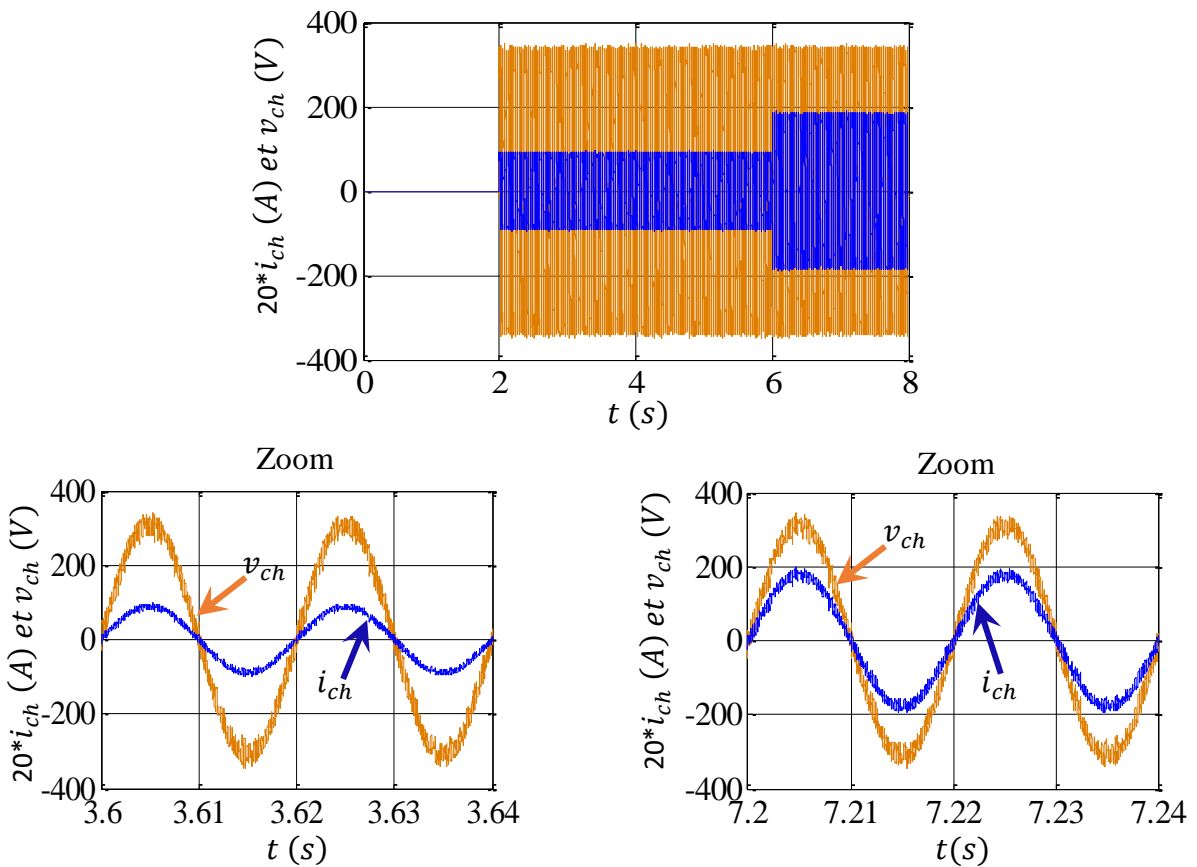


Fig.III.23 Allure du courant et de tension de la charge

### III.10.1.2 Influence de la variation de charge triphasé inductif

Dans cet essai, on s'intéresse aux performances de la commande vectorielle pour des variations de charges inductives.

- A  $t=2s$ , nous avons appliqué une charge de 50% de la valeur nominale, ( $L=0.05H$ ,  $R=37\Omega$ ).
- A  $t=6$ , nous avons inséré une autre charge de 100% de la valeur nominale indiquée.

La tension du bus continue, la puissance et le couple électromagnétiques, les flux rotoriques les courants statoriques, l'allure du courant et de tension statorique, évoluent d'une manière identique à celle observée lors de la variation de la charge résistives comme montrer sur les figures III.24-III.25-III.26-III.27-III.28-III.29-III.31 respectivement.

Nous observons par contre dans la figure III.32, un petit déphasage au niveau de l'allure du courant et de la tension de charge, qui est dû à l'effet inductif.

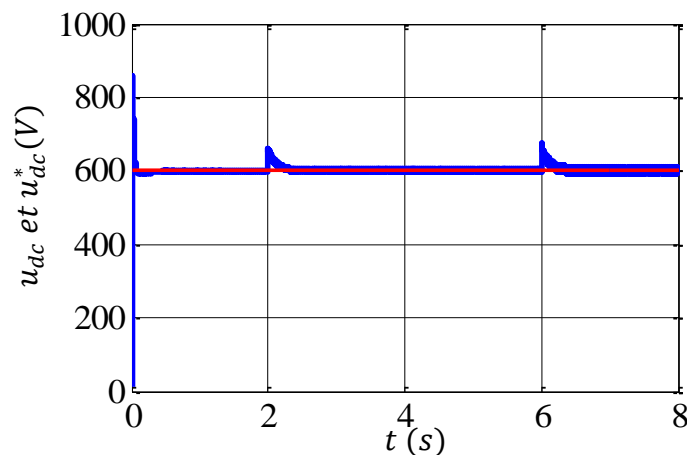


Fig.III.24 Allure de tension du bus

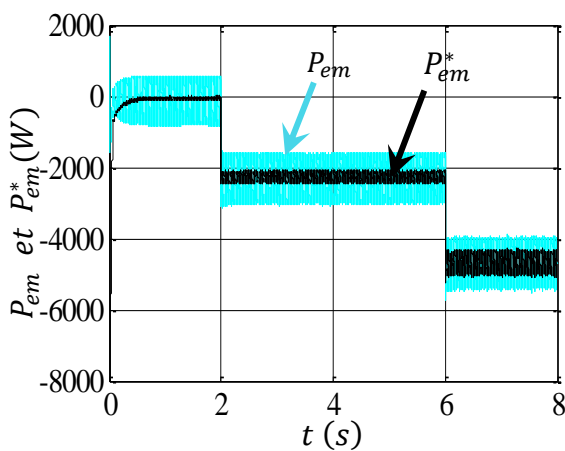


Fig.III.25 Allure de la puissance électromagnétique et sa référence

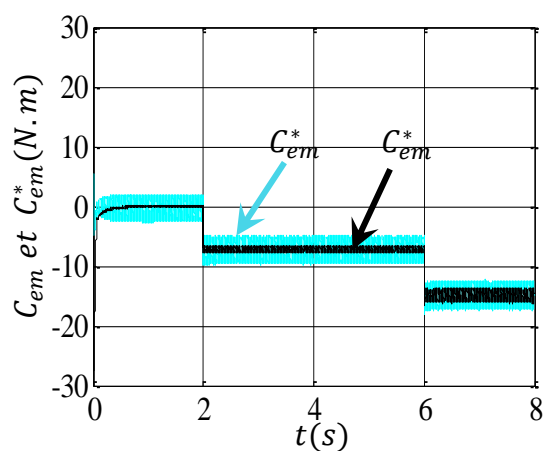


Fig.III.26 Allure du couple électromagnétique et sa référence

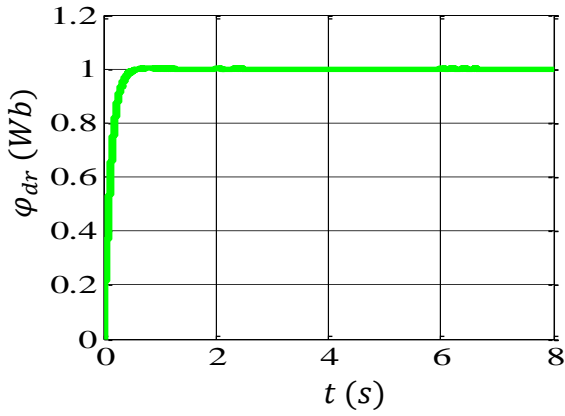


Fig.III.27 Allure du flux rotorique direct

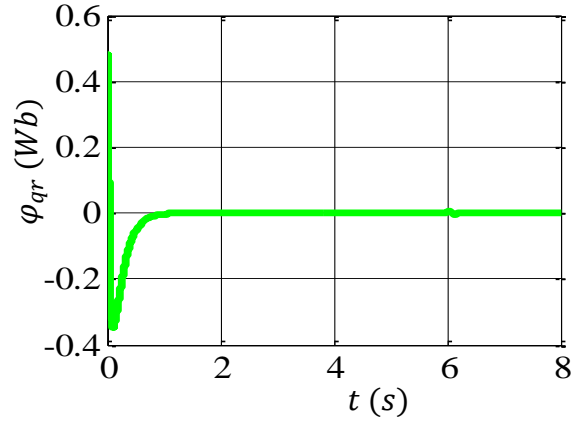


Fig.III.28 Allure du flux rotorique quadrature

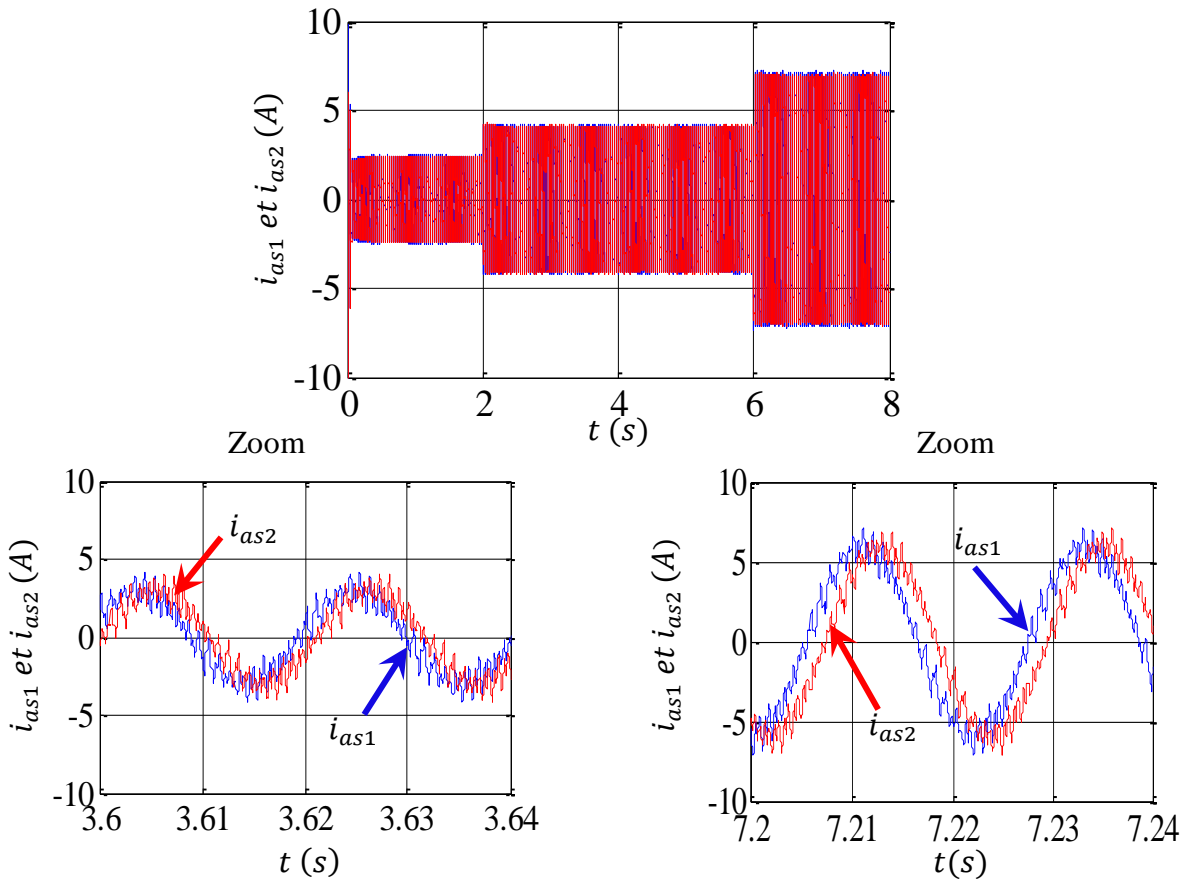


Fig.III.29 Allure des courants statoriques des deux étoiles

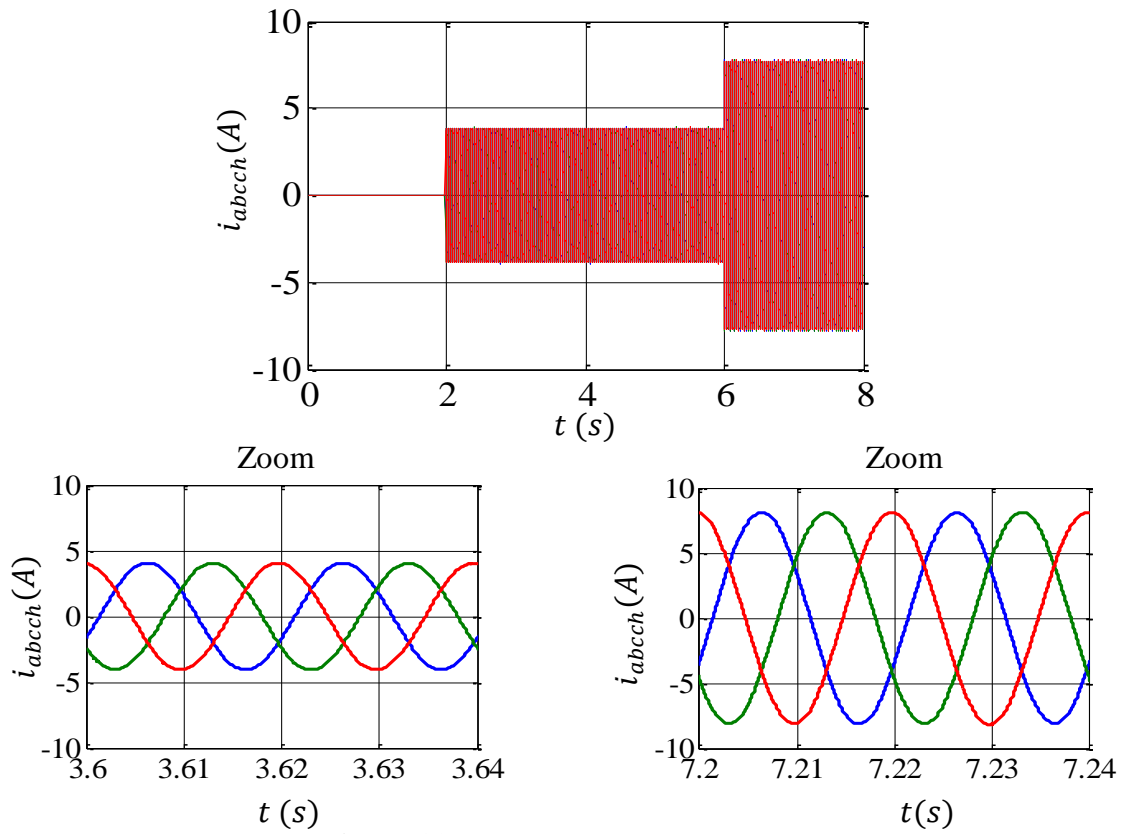


Fig.III.30 Allure des courants de la charge

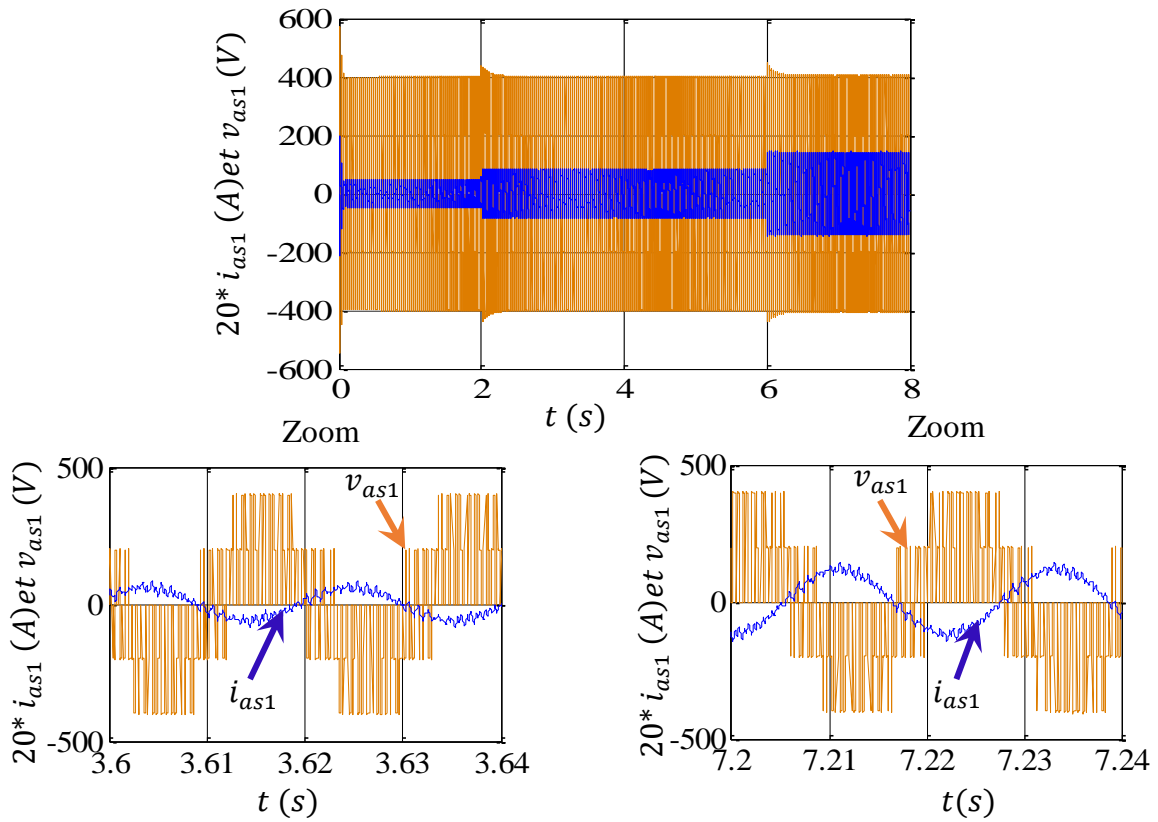
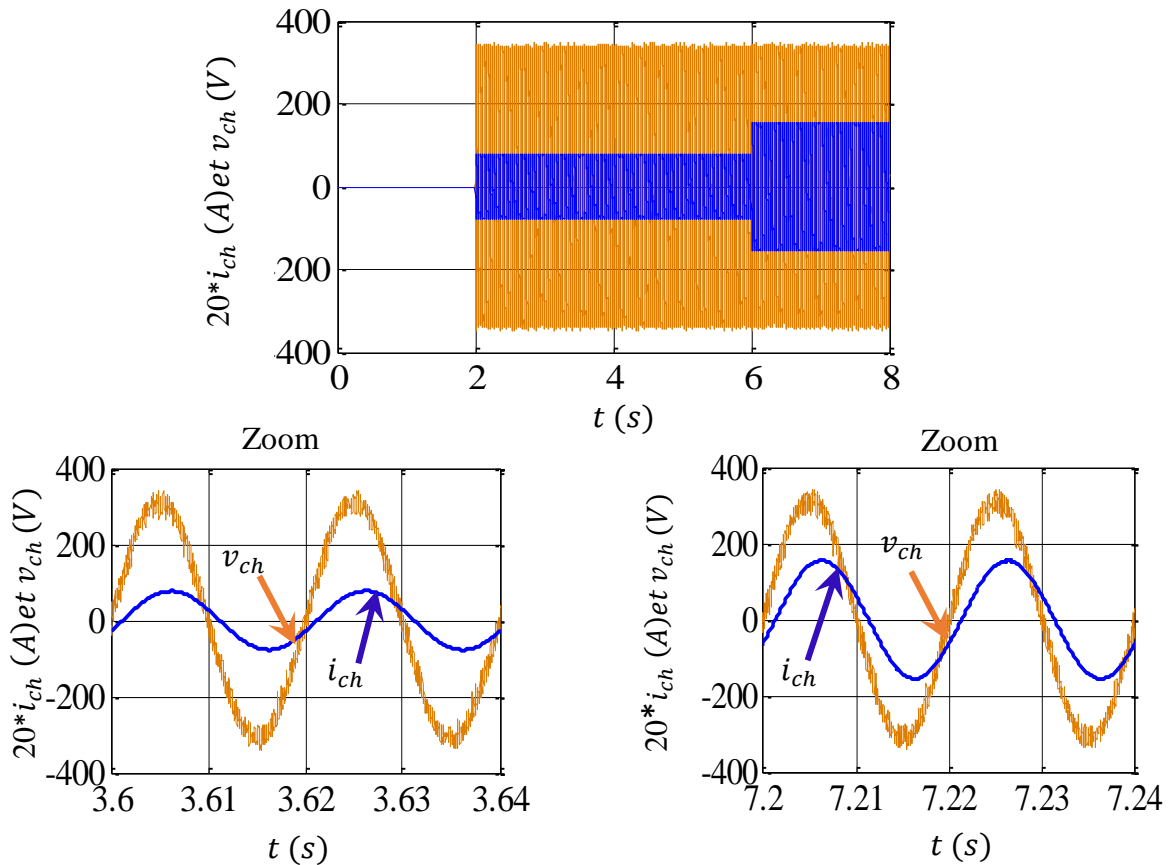


Fig.III.31 Allure du courant et de tension statorique de l'étoile 1





**Fig.III.32** Allure du courant et de tension de la charge

### III.10.2 Influence de la vitesse du vent

Dans cet essai nous avons procédé à la variation de la vitesse d'entraînement en appliquant un profil de vent présenté dans la figure III.33 et nous avons fixé la charge triphasée inductive à 75% de la valeur nominale. Il convient de souligner que le cas de vitesse variable a uniquement pour but un caractère illustratif pour la stratégie de la commande.

La tension du bus continu est bien contrôlée et suit parfaitement sa référence comme montré dans la figure III.34.

D'après la figure III.35, la puissance électromagnétique subit une légère augmentation durant l'élévation de la vitesse et une légère diminution durant la diminution de cette dernière. Cependant, le couple se maintient constant et reste insensible aux différentes variations comme présenté dans la figure III.36.

L'analyse des figures III.39- III.40, a permis de voir le comportement des courants statoriques, du courant et de la tension statorique, ou on constate les mêmes performances que celles obtenues lors de la variation de la charge inductive.

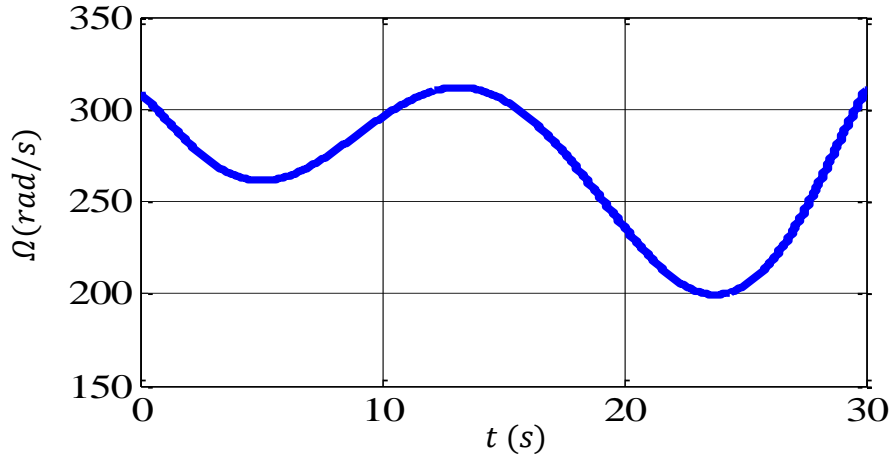


Fig.III.33 Allure de profil de vent

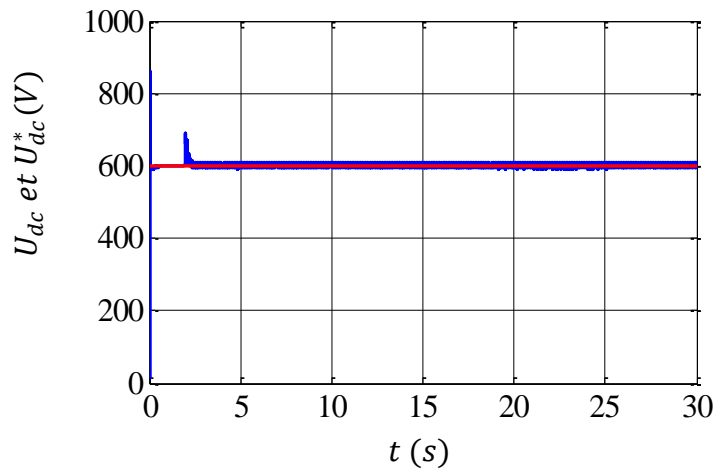


Fig.III.34 Allure de tension du bus continu

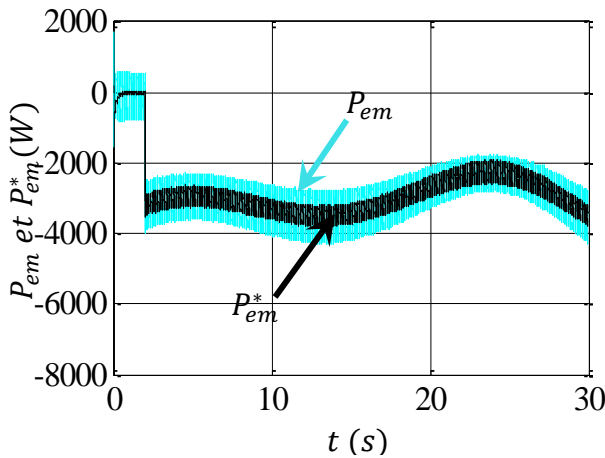


Fig.III.35 Allure de la puissance électromagnétique et sa référence

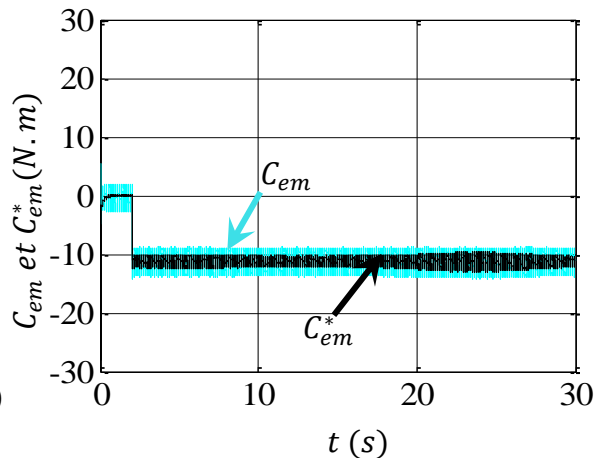
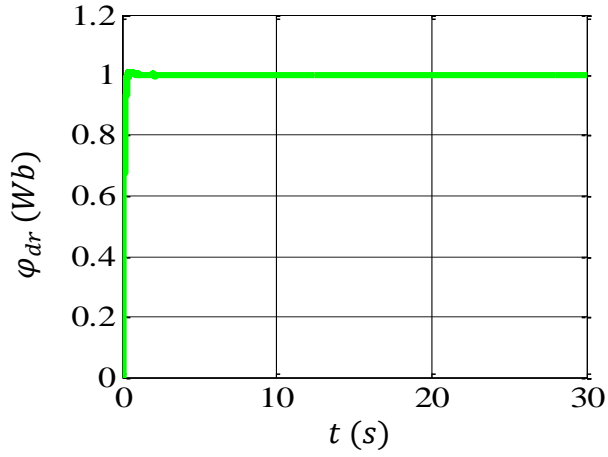
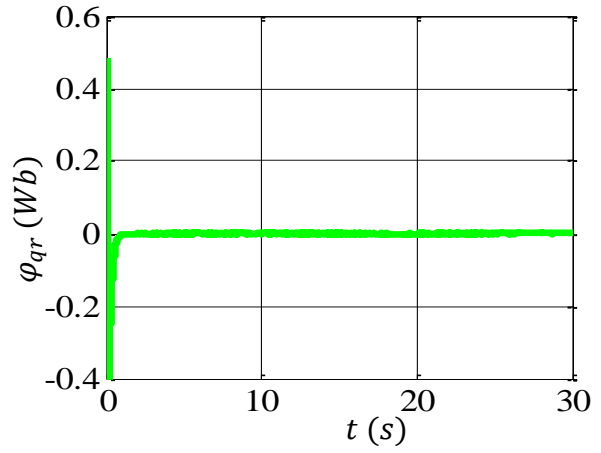


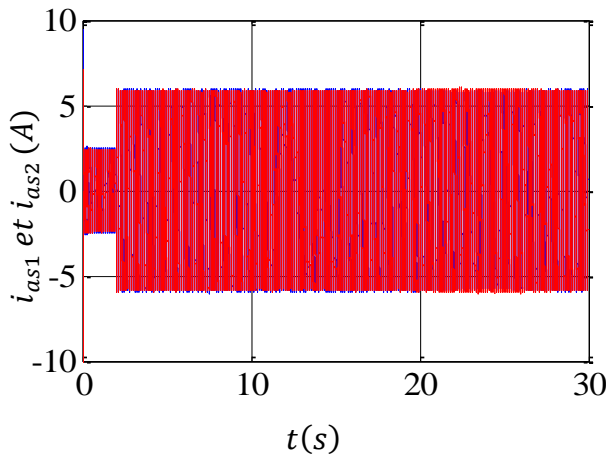
Fig.III.36 Allure du couple électromagnétique et sa référence



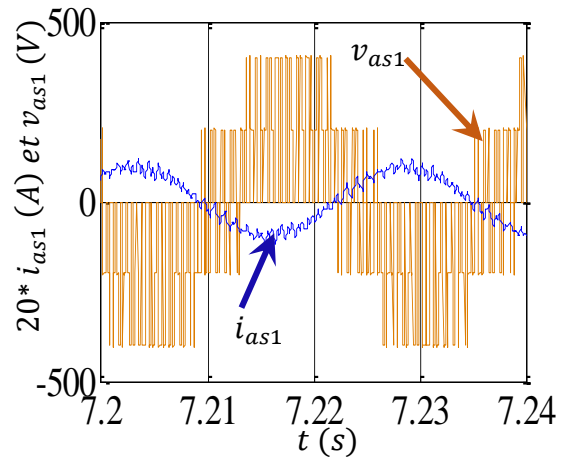
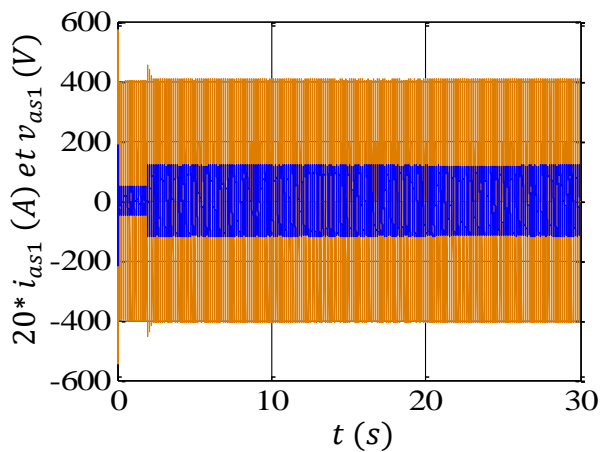
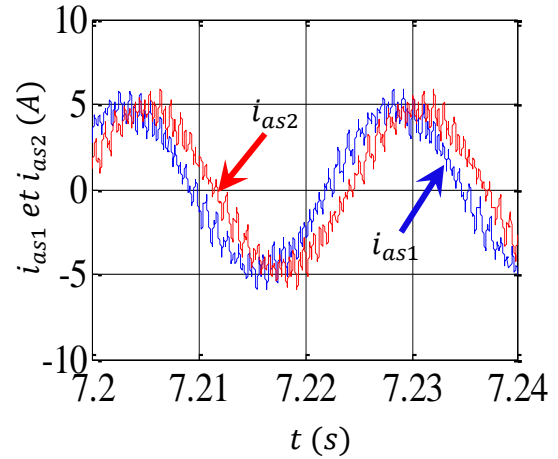
**Fig.III.37** Allure du flux rotorique direct



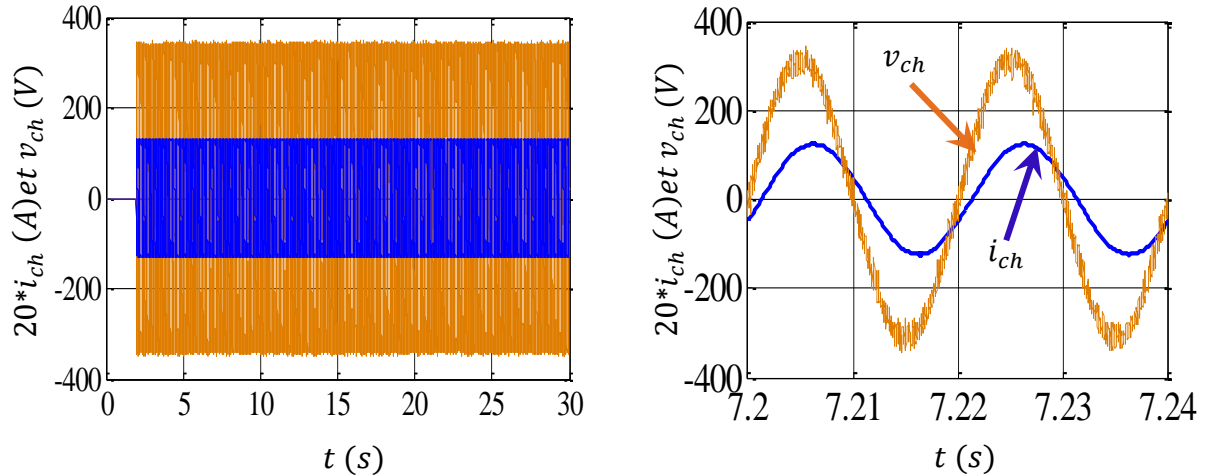
**Fig.III.38** Allure du flux rotorique quadrature



**Fig.III.39** Allure des courants statoriques des deux étoiles



**Fig.III.40** Allure du courant et de tension statorique de l'étoile 1



**Fig.III.41** Allure du courant et de tension de la charge

### III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une structure de commande d'une génératrice asynchrone à double étoile exploitée dans des sites autonomes. Nous avons présenté la description de cette dernière, en adoptant un modèle mathématique qui définit les différentes équations décrivant le fonctionnement de la machine. La génératrice est connectée au convertisseur pour le contrôle de la tension en présence des variations de la charge ainsi que la vitesse. Les simulations ont démontré la capacité de contrôler efficacement notre machine en utilisant cette commande, ce qui constitue une solution efficace pour gérer les variations de vitesse et de charge. Tant que l'énergie du vent disponible est suffisante pour satisfaire la demande de la charge, l'amplitude la tension de sortie est bien régulée.

## ***Conclusion générale et perspectives***

Ce travail aborde de manière générale l'étude, la modélisation, la commande et la simulation de la machine asynchrone à double étoile en tant que générateur. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances d'un générateur asynchrone à double étoile dans un système autonome de production d'énergie éolienne.

Plus spécifiquement, le premier chapitre a abordé les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension des systèmes de conversion d'énergie éolienne, des systèmes autonomes et des machines utilisées dans ce domaine. Ce chapitre a également permis d'approfondir nos connaissances sur les différents types de machines électriques, ainsi que sur l'origine et l'importance de l'utilisation de machines multi-phasées dans les applications à haute puissance. Cela a contribué à renforcer notre compréhension et à enrichir notre savoir dans ce domaine.

Le deuxième chapitre se concentre sur la description et la modélisation de la machine à asynchrone à double étoile (MASDE) en utilisant les équations mathématiques dans le repère biphasé, grâce à la transformation de Park. Cette approche de modélisation a permis d'obtenir un modèle simplifié qui représente efficacement le fonctionnement de la MASDE. Une fois la modélisation achevée, des simulations ont été exécutées en alimentant la machine à l'aide de deux sources triphasées, puis à l'aide de deux onduleurs de tension contrôlés par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre de ce mémoire met en œuvre la commande vectorielle indirecte à flux orienté sur la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) connectée à des redresseurs MLI. Cette commande vise à contrôler le couple de la génératrice de manière similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Dans la première partie du chapitre, la modélisation du système proposé est présentée. Ensuite, des simulations numériques sont effectuées pour étudier le comportement de cette méthode de commande et mettre en évidence les caractéristiques de la commande sur la GASDE.

La commande vectorielle indirecte à flux orienté avec régulation de vitesse permet de maintenir la tension du bus continu constante, ce qui est essentiel pour assurer le bon fonctionnement du système. Différents essais sont réalisés, notamment des variations de charge et de vitesse. Les régulateurs PI permettent de bien contrôler la tension et d'orienter efficacement le flux

rotorique. Ces résultats apportent des réponses à de nombreuses questions et réflexions soulevées précédemment par des chercheurs dans le domaine.

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ Les variations de charge et de vitesse sont testées sur le système afin d'évaluer son évolution, en prenant en compte différents types de charges (résistives et inductives).
- ✓ L'application d'une stratégie de contrôle vectoriel pour réguler la tension de la GASDE, qui alimente un réseau autonome, en se basant sur le principe de l'orientation du flux rotorique a été proposée.

Pour continuer cette recherche, il est envisageable d'identifier les perspectives de recherche qui sont liées au thème abordé dans ce mémoire, notamment :

- L'intégration d'un dispositif de stockage d'énergie tel qu'une batterie, dans le système
- L'évaluation de l'application de différentes techniques de commande robuste, telles que la logique floue, la commande adaptative, les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques, dans le but d'améliorer les performances du système.
- Analyser les effets des perturbations et des variations de charges sur le système de commande, puis identifier des stratégies de compensation efficaces.

## *Références bibliographiques*



## Références bibliographiques

### A

- [Abd11] R.Abdesmed, « Modélisation et simulation des machines électriques » Ellipses Marketing, EditionTechnosup,2011.
- [Ame09] S.Amedjkouh « Technologie des aérogénérateurs », mémoire de magister, université de Bejaia, 2009.
- [Ami11] H.Amimeur, R. Abdessmed, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, F. Hamoudi, S. Chekkal, « A sliding mode control for dual-stator induction motor drives fed by matrix converters, journal of electrical engineering JEE », Vol. 11, No. 2, Art.21, 2011.
- [Ami12] H.Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile », thèse de doctorat, université de Batna, 2012
- [Ana09] O.Anaya-lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, and all, « Wind energy generation: modeling and control », john wiley & amp; sons, ltd, ISBN: 978-0-470-71433-1, 2009.

### B

- [Ben05] S.Benrabiam, A. Bendib, « Simulation numérique d'un moteur asynchrone double étoile commande par onduleur multiniveaux », thème d'ingénieur, université de Msila, 2005.
- [Ben10] L.Benalia, « Commande en tension des moteurs à inductions double alimentes », thèse de doctorat, université de Batna 2010.
- [Ben13] Y.Bendjeddou, « Contribution à l'étude des performances d'un générateur asynchrone », mémoire de magister, université de Batna, 2013.
- [Ben19] Y.Bendjeddou, « Contribution à l'amélioration des performances des aérogénérateurs asynchrones », thèse de doctorat, université de Batna, 2019.
- [Ber19] T.Berkane, F. Khaled, « Étude par simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome », mémoire de master, université de Bejaia, 2019.



- [Ben19m] M.Benakcha, « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile GASDE », thèse de doctorat université de M'sila, 2019.
- [Bou14] D.Bouamara, N.Beddi, « Etude d'une machine asynchrone double étoile : (modélisation, alimentation et commande) », mémoire de master, université d'El oued, 2014.

### C

- [Che11] S.Chekkal, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, H. Amimeur, « New control strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator, 10th international conference on environmental and electrical engineering IEEEIC 11 », c 2011 IEEE, pp. 268–271, Rome, Italy, 2011.
- [Che15] A.Chemidi, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2015.
- [Che15s] S.Chekkal, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoile dans un système éolien », thèse doctorat, université de Bejaia ,2015
- [Cre97] G.Crellet, G. Clerc, « Actionneurs électriques », édition eyrolles, France, 1997.

### D

- [Dja13] A.Djaborebbi, « Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile », thème de master, université de Ouargla ,2013.

### F

- [Fai15] M.Faid, F.Khirredine « Etude et simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome », mémoire de master, université de Bejaia, 2015.

### H

- [Had01] D.Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », thèse de doctorat, université de Nancy1, 2001.
- [Ham13] K.Hammitouche « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne de traction ferroviaire », mémoire de magister, université de Bejaia ,2013.
- [Ham07] H.Hammache, « Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande », mémoire de magister de l'école militaire polytechnique, Alger, 2007.

[Ham14] R.Hamoud, « Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour argentation », université de Setif-1, 2014.

[Ham14k] L.Hama, M. Kekouche « Etude et commande d'une machine asynchrone double étoile », mémoire de master, université de Bejaia, 2014.

I

[Idj10] M.Idjadarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », université de Bejaia ,2010.

K

[Kah20] H.Kahal « Commande robuste d'une GASDE intégrée dans un système éolien à double rotor », thèse de doctorat, université de Chlef 2020.

[Kor09] B.Korich, « Commande d'un convertisseur AC/DC triphasé à quatre bras en régime déséquilibré », mémoire de magister, école militaire polytechnique d'Alger, 2009.

[Ker13] S.Kercha, W. Goubi « Etude et modélisations des machines électriques double étoile », université de Ouargla, 2013.

[Kiy20] B.Kiyyour « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile », thèse doctorat, université de Biskra ,2020.

M

[Mah12] M.A.E. Mahboub, « Modélisation et commande d'un system éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais », mémoire de magister, université de Sétif, 2012.

[Maz20] F.Mazouz, « Contrôle des puissances actives et réactives dans les aérogénérateurs doubles alimentés », thèse de doctorat, université de Batna, 2020.

[Mef14] L.Meftah, '' Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile'', mémoire magister, université de Sétif 1,2014.

[Mer07] E.Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, « Field oriented control of a dual star induction machine using fuzzy regulators », 4th International conference on computer integrated manufacturing CIP'07, university of Setif,,Paper Ref: F10, 2007.

[Mer05] E.Merabet et A.Belayali, « Commande par logique floue d'une machine asynchrone à double stator », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.

- [Mer08] E.Merabet, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile », université de Batna, 2008
- [Mir05] A.Mireki, « Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse,2005.
- [Mok10] L.Mokhtari, « Commande vectorielle d'un moteur asynchrone double étoile à vitesse variable », mémoire d'ingénieur, université de Laghouat, 2010.
- [Mse19] A.Mseddi « Modélisation et commande d'un générateur éolien à double excitation isolé en vue de l'amélioration de son rendement et de la diminution de la fatigue mécanique », thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise Fraane, ,2019.

O

- [Oud04] Z.Oudjebour, E. M.Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki, I. Messaif, «Indirect space vector control of a double star induction machine fed by two five-levels NPC VSI international conference on electric machine», ICEM'04, Poland, 2004.

P

- [Pie92] M.d.Pietrzak, B.d.Fornel, « Comparaison et synthèse des procédés de commande vectorielle »,SEE Journée d'études Lille., pp. 1–19, Lille,1992.

S

- [S1] <http://www.energienouvelable.org> consulté le 30/02/2023.
- [S2] <https://www.surtec.fr/sites-autonomes-en-energie/principe/> consulté le 15/02/2023.
- [S3] <https://www.climamaison.com/lexique/generateurphotovoltaïque.htm> consulté le 14/02/2023
- [S4] <https://www.edfenr.com/lexique/generateur/> consulté le 10/06/2023
- [S5] <https://rn77-energies.pagesperso-orange.fr/element/photovoltaïque.html> consulté le 15/02/2023
- [S6] <http://www.catpowerdesign.fr/actualites/systeme-embarque> consulté 14/02/2023
- [Sai16] Z.R.T Saidi,, « Contrôle direct de puissance d'une redresseur triphasé a MLI » thèse de master,université de Tizi Ouzou, 2016

- [Sal07] G.SALLOUM, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2007
- [Sin02] G.K. Singh, « Multi-phase induction machine drive research a survey », electric power system research., Vol. 61, pp. 139-47, 2002.
- [Sin03] G.K. Singh, Al Kazzaz, «Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research a survey Electric Power System» Res 64(2):145-158 2003.

T

- [Tah20] K.Tahir, S.Semsar « Machine asynchrone double étoile dédiée à un système éolien », mémoire de master, université de Bejaia, 2020
- [Tam05] S.Tamazoult « Etude comparative de l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation par un convertisseur statique AC/AC a commutation forcée et naturelle », mémoire de magister, université de Batna, 2005.
- [Tam06] H.Tamrabet, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone », mémoire de magister, université de Batna, 2006.

V

- [Vid04] P.Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.

Y

- [Yah11] A.Yahdou, « Commande et observation par mode glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique », mémoire de magister, université de Chlef, 2011.

Z

- [Zam16] M.H.Zamani, G.H. Riahhy and M. Abedi, « Rotor speed stability improvement of dual stator winding induction generator-based wind farms by control windings voltage-oriented control », IEEE, transactions on power electronics, Vol. 31, N°8, pp. 5538 - 5546, 2016.
- [Zou21] I.Zouaghi « Etude des performances énergétiques d'une éolienne terrestre a trois pales », université de Annaba, 2021

## Annexe A

### A.1 Paramètres de la MASDE et la GASDE

Les paramètres de la MASDE et la GASDE sont donnés par le tableau (A.1)

Puissance nominale	$P_n = 4.5 \text{ Kw}$
Tension nominale	$v_n = 220V$
Fréquence	$f_s = 50\text{Hz}$
Résistance d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	$R_{s1} = R_{s2} = 3.72\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = 2.12\Omega$
Inductance de fuite d'une phase (étoile 1 et 2)	$L_{s1} = L_{s2} = 0.022H$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.006H$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.3672H$
Nombre de paires de pôles	$P = 1$
Moment d'inertie	$J = 0.0625\text{kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.001\text{N.m.s/rd}$

Tableau A.1 : Paramètres de la MASDE et la GASDE

### A.2 Paramètres de la turbine

Les paramètres de la turbine sont donnés par le tableau (A.2)

Rayon de l'éolienne	$R=36\text{m}$
Gain du multiplicateur de vitesse	$G=90$
Nombre de pales	3

Tableau A.2 : Paramètres de la turbine