

THÈSE

Présentée par

M. HAMITOUCHE KAMEL

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Electrotechnique

Option : Systèmes électro-énergétiques

Thème

Contribution à l'étude d'un aérogénérateur à base d'une génératrice
asynchrone polyphasée en fonctionnement autonome

Soutenue le : 13/12 / 2023

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr KASDI Ahmed	MCA	Univ. de Bejaia	Président
Mr AOUZELLAG Djamel	Professeur	Univ. de Bejaia	Rapporteur
Mr RADJELI Hammoud	Professeur	Univ. de Setif 1	Co-Rapporteur
Mr RAHMANI Lazhar	Professeur	Univ. de Setif 1	Examineur
Mr MERAHI Farid	MCA	Univ. de Setif 1	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Je remercie DIEU le tout Puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à terme ce travail de thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à l'encontre de mon directeur de thèse, Monsieur AOUZELLAGUE Djamel, Professeur à l'université de Bejaia qui m'a toujours soutenu et encouragé par ses idées et ses orientations.

Je remercie aussi mon Co-directeur de thèse, Monsieur RADJELI Hammoud, Professeur à l'université de Sétif pour ses orientations, ses encouragements et sa disponibilité.

Mes remerciements vont également à Monsieur KASDI Ahmed, Maître de conférence à l'université de Bejaia pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Un remerciement particulier à Monsieur RAHMANI Lazhar, Professeur à l'université de Sétif, et à Monsieur MERAHI Farid, Maître de conférence à l'Université de Sétif, qui m'ont honoré en acceptant d'être parmi le jury comme examinateurs.

Je tiens à remercier :

Monsieur GHEDAMSI Kaci, Professeur à l'université de Bejaia pour son aide et ces conseils ;

Monsieur AMIMEUR Hocine, Maître de conférence à l'université de Bejaia pour sa contribution, sa disponibilité et ses conseils ;

Madame CHEKKAL Samira, Maître de conférence à l'université de Bejaia pour sa contribution, ses orientations et son aide.

Je tiens à remercier très particulièrement, Monsieur ADJATI Arezki, Docteur à l'université de Bejaia pour son aide précieux et ses encouragements.

Je tiens à remercier bien sûr, ma famille qui n'a cessé en aucun moment de croire en moi, qui m'encourage, et qui me soutient, en particulier mes parents à qui je dédie cette thèse.

Sans oublier, tous mes collègues et enseignants de l'université de Bejaia pour leurs soutiens et encouragements pendant toute la durée de ma thèse.

*A la mémoire de mon père
A ma mère que je dois tout
A mes frères et sœurs
A mes beaux-frères et belles sœurs
Et tous leurs enfants
A mes amies et collègues de travail
Je dédie cette thèse*

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des symboles	v
Abréviations	i

Introduction générale

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I

Généralités sur les Aérogénérateurs

I.1 Introduction.....	04
I.2 Etat de l'art des systèmes éoliens.....	04
I.2.1 Production d'énergie éolienne.....	04
I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	05
I.2.2.1 Avantages	05
I.2.2.2 Inconvénients	06
I.3 Différents types d'éoliennes	06
I.3.1 Eoliennes à axe horizontal	06
I.3.2 Eoliennes a axe vertical	07
I.4 Différentes configurations utilisées dans la conversion d'énergie éolienne.....	08
I.4.1 Eoliennes connectées au réseau électrique.....	08
I.4.1.1 Eoliennes à vitesse fixe.....	08
I.4.1.2 Eoliennes à vitesse variable.....	09
I.4.2 Eoliennes en fonctionnement autonome.....	14
I.4.2.1 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	14
I.4.2.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	15
I.5 Différents systèmes de stockage.....	16
I.5.1 Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'eau.....	16
I.5.2 Stockage électrochimique.....	16
I.5.2.1 Batteries électrochimiques.....	16

I.5.2.2 Supercondensateurs.....	17
I.5.2.3 Stockage d'énergie sous forme d'hydrogène	17
I.5.3 Volants d'inertie.....	18
I.6 Généralités sur les machines multiphasées.....	18
I.6.1 Machines multiphasées de type 1.....	19
I.6.2 Machines multiphasées de type 2.....	19
I.6.3 Avantages des machines multiphasées.....	20
I.6.4 Inconvénients des machines multiphasées.....	21
I.6.5 Différentes configurations des génératrices asynchrones à double étoile dans un système autonome.....	22
I.7 Conclusion	24

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

II.1 Introduction.....	25
II.2 Description de la machine asynchrone à double étoile.....	25
II.3 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile.....	26
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	26
II.3.2 Modèle de la machine asynchrone à double étoile	27
II.3.2.1 Equations électriques.....	27
II.3.2.2 Equations magnétiques.....	28
II.3.2.3 Expression du couple électromagnétique.....	29
II.3.2.4 Equation mécanique.....	29
II.3.3 Modèle biphasée de la MASDE.....	30
II.3.3.1 Transformation de Park.....	30
II.3.3.2 Choix du référentiel	32
II.3.3.3 Equations électriques et magnétiques.....	32
II.3.3.4 Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	32
II.3.4 Représentation d'état de la MASDE	34
II.4 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI.....	36
II.4.1 Modélisation de l'onduleur.....	36
II.4.2 Commande par modulation sinus-triangle.....	37

II.4.3 Association de la MASDE-onduleurs de tension à commande MLI.....	38
II.5 Simulation et interprétation des résultats.....	39
II.5.1 Machine à double étoile à paramètres identiques.....	39
II.5.2 Machine à double étoile à paramètres non identiques.....	41
II.6 Conclusion.....	43

Chapitre III

Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile

III.1 Introduction.....	44
III.2 Principe de la commande vectorielle.....	44
III.3 Choix d'orientation du flux	45
III.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle	46
III.4.1 Méthode de commande vectorielle directe	46
III.4.2 Méthode de commande vectorielle indirecte.....	46
III.5 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse.....	47
III.5.1 Identification des paramètres des régulateurs PI.....	49
III.5.2 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse.....	51
III.5.3 Identification des paramètres du régulateur de vitesse	53
III.5.4 Simulation et interprétation des résultats.....	53
III.6 Commande vectorielle directe avec régulation de vitesse.....	55
III.6.1 Estimateur du flux rotorique.....	56
III.6.2 Identification des paramètres du régulateur de flux.....	56
III.6.3 Simulation et interprétation des résultats.....	59
III.7 Conclusion.....	59

Chapitre IV

Intégration de la machine asynchrone à double étoile à paramètres non identiques dans un système éolien

IV.1 Introduction	60
IV.2 Description du système étudié.....	60
IV.2.1 Modélisation du système éolien.....	61

IV.2.1.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	61
IV.2.1.2 Modélisation de la turbine.....	62
IV.2.1.3 Technique d'optimisation de la puissance	65
IV.2.2 Application de la technique de régulation à la MASDE non identique	66
IV.3 Simulation et interprétation des résultats	68
IV.3.1 Simulation de la MASDE avec profil de vent variable	68
IV.3.2 Simulation de la MASDE avec limitation de la puissance.....	74
IV.3.3 Simulation de la MASDE en survitesse.....	76
IV.3.4 Simulation de la MASDE en survitesse avec limitation de la puissance	78
IV.4 Conclusion	79

Conclusion générale

Conclusion générale	80
---------------------------	----

Bibliographie

Bibliographie	82
---------------------	----

Annexes

Annexes	90
---------------	----

Liste des figures

I.1	Première ferme éolienne en Algérie	5
I.2	Aérogénérateur à axe horizontal.....	7
I.3	Eolienne type « Darrieus »	7
I.4	Eolienne type « Savonius »	7
I.5	Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe <i>et connecté au réseau</i>	9
I.6	Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne	10
I.7	Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur	10
I.8	Génératrice asynchrone à double étoile reliée au réseau électrique.....	11
I.9	Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.	12
I.10	Machine synchrone à rotor bobiné reliée au réseau	13
I.11	Machine synchrone à aimant permanent.....	13
I.12	Machine synchrone connectée à un redresseur MLI.....	15
I.13	Machine asynchrone dans un system autonome	15
I.14	Schéma de principe d'une STEP à conduite souterraine.....	16
I.15	Principe de l'électrolyse de l'eau	17
I.16	Réaction de base d'une pile à combustible	18
I.17	Représentation vectorielle des machines multiphasées de type 1.....	19
I.18	Représentation vectorielle des machines multiphasées de type 2.....	20
I.19	Machine à double étoile dans un fonctionnement autonome	22
I.20	Machine à double étoile à paramètres non identiques relié à deux charges autonomes.....	23
I.21	Schéma de configuration d'une machine à double étoile à paramètres non identiques relié à une charge autonome et un régulateur de puissance réactive ..	23
II.1	Représentation schématique des enroulements de la MASDE.....	26
II.2	Représentation schématique de modèle de Park de la MASDE.....	30
II.3	Schéma d'un onduleur de tension triphasée	37

II.4	Association MASDE- Convertisseurs de tensions à commande MLI.....	39
II.5	Evolution des caractéristiques de la MASDE à paramètres identiques alimentée par deux convertisseurs, suivie de l'application des charges $C_r = 14 \text{ N.m}$ et $C_r = -14 \text{ N.m}$ respectivement entre les intervalles du temps $[2, 4] \text{ s}$ et $[6, 8] \text{ s}$	40
II.6	Evolution des caractéristiques de la MASDE à paramètres non identiques alimentée par deux convertisseurs, suivie de l'application des charges $C_r = 14 \text{ N.m}$ et $C_r = -14 \text{ N.m}$ respectivement entre les intervalles du temps $[2, 4] \text{ s}$ et $[6, 8] \text{ s}$	42
III.1	Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE	45
III.2	Schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté (FOC)	47
III.3	Schéma d'un système asservi de premier ordre régulé par un régulateur PI	49
III.4	Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques	50
III.5	Schéma de défluxage	51
III.6	Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse	51
III.7	Représentation schématique du bloc de découplage FOC.....	52
III.8	Schéma de la boucle de régulation de la vitesse rotorique.....	53
III.9	Régulation de la vitesse par la méthode indirecte, avec application des charges $C_r=14\text{Nm}$ et -14Nm entre les intervalles de temps $[2, 4] \text{ s}$ et $[6, 8] \text{ s}$	55
III.10	Représentation schématique de la commande MFOC sur la MASDE	55
III.11	Boucle de régulation du flux rotorique.....	56
III.12	Représentation schématique du bloc de découplage MFOC	57
III.13	Régulation de la vitesse par la méthode directe.....	58
IV.1	Représentation du système étudié	60
IV.2	Zones de fonctionnement d'une éolienne	61
IV.3	Schéma de la turbine éolienne	62
IV.4	Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse	62
IV.5	Schéma bloc du modèle de la turbine	64
IV.6	Courbe typique de la puissance extraite par la turbine en fonction de la vitesse du vent	65
IV.7	Système de contrôle de puissance de la MASDE	67
IV.8	Schéma fonctionnel de la boucle interne de la commande (FOC).....	68
IV.9	Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge nominale	70

IV.10	Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 75% de la puissance nominale.....	72
IV.11	Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 50% de la puissance nominale	73
IV.12	Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 75% de la puissance nominale avec limitation de puissance	74
IV.13	Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 50% de la puissance nominale avec limitation de puissance.....	75
IV.14	Résultats de simulation de la GASDE avec un profil de vent en survitesse alimentant une charge nominale	77
IV.15	Résultats de simulation de la GASDE avec un profil de vent en survitesse alimentant une charge nominale avec limitation de puissance.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1	Paramètres de la MASDE à étoiles identiques	88
Tableau 2	Paramètres de la MASDE à étoiles non identiques	88
Tableau 3	Paramètres de la turbine éolienne	89
Tableau 4	Paramètres du bus continu et de la charge	89

Liste des symboles

C

C	Capacité du condensateur du bus continu
$C_{1,2,3,4,5,6}$	Paramètres dépendant des caractéristiques aérodynamiques de la turbine
C_{em}	Couple électromagnétique
$C_{em1,2}$	Couple électromagnétique de l'étoile 1 et 2
C_{emt}	Couple électromagnétique total
$C_{em1,2}^*(lim)$	Couple électromagnétique de référence limite
$C_{emMax1,2}$	Couple électromagnétique maximal de l'étoile 1 et 2
$C_{em_{opt}}^*$	Couple électromagnétique total de référence optimal
C_g	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après le multiplicateur
C_p	Coefficient de puissance
$C_{p_{max}}$	Coefficient de puissance maximal
C_r	Couple résistant de la machine.
C_t	Couple mécanique de l'arbre de la turbine

E

E	Tension continue
$E_{1,2}$	Tension continue des deux étoiles de la MASDE.
E_{bat}	Tension de la batterie
e^-	Charge électrique

F

f_r	Fréquence des tensions de références des onduleurs
f_l	Fonction de connexion logique des bras d'onduleur.
f_p	Fréquence de la porteuse

G

G	Rapport du multiplicateur de vitesse
-----	--------------------------------------

H

H	Atome d'hydrogène
-----	-------------------

I

I_c	Courant capacitif du bus continu
I_{dc}	Courant du bus continu
I_{ch}	Courant de la charge
i_A, i_B, i_C	Courant triphasé de l'onduleur.
$i_{sa,b,c 1,2}$	Courant triphasé statorique (étoile 1 et 2)
$i_{ra,b,c}$	Courant triphasé rotorique
i_{s1}, i_{s2}, i_r	Matrice des courants triphasés statorique et rotorique.
i_{ds1}, i_{qs1}	Courants statoriques de l'étoile 1 dans le repère de Park (d, q)
i_{ds2}, i_{qs2}	Courants statoriques de l'étoile 2 dans le repère de Park (d, q)
i_{dr}, i_{qr}	Courants rotorique dans le repère de Park (d, q)
I_a	Courant de l'induit d'une machine à courant continu
I_f	Courant de l'inducteur d'une machine à courant continu
i_{ds}^*	Courant statorique direct total de référence.
inv	Inverse d'une fonction
$I_{dc1,2}$	Courant du bus continu de l'étoile 1 et 2.
i_{ds}^*	Courant direct de référence total

J

J	Moment d'inertie de la MASDE
J_t	Moment d'inertie de la turbine
J_T	Moment d'inertie total de turbine et de la génératrice

K

K_i, K_i'	Paire transistor diode d'un bras d'onduleur
K, K'	Coefficients du couple d'une machine à courant continu
K''	Constante des couples de la MASDE
K_f	Coefficient de frottement de la MASDE
K_{ft}	Coefficient de frottement de la turbine
K_{fT}	Coefficient de frottement total de la turbine et de la génératrice
K_p, K_i	Gain proportionnel et intégral du régulateur PI
$K_{ps1,2}, K_{is1,2}$	Gain proportionnel et intégral du régulateur PI de la régulation des courants statoriques de la MASDE

K_{pv}, K_{iv}	Gain proportionnel et intégral du régulateur PI de la régulation de la vitesse de la MASDE
K_{pf}, K_{if}	Gain proportionnel et intégral du régulateur PI de la régulation du flux de la MASDE
K_{opt}	Coefficient de puissance optimal

L

L_{s1}	Inductance de fuite d'une phase de l'étoile 1
L_{s2}	Inductance de fuite d'une phase de l'étoile 2
L_r	Inductance de fuite d'une phase du rotor
$L_{s1,s1}$	Matrice des inductances cycliques de l'étoile 1
$L_{s1,s2}$	Matrice des inductances cycliques étoile1-étoile 2
$L_{s1,r}$	Matrice des inductances cycliques étoile 1-rotor
$L_{s2,s2}$	Matrice des inductances cycliques de l'étoile 2
$L_{s2,s1}$	Matrice des inductances statoriques cycliques étoile2-étoile 1
$L_{s2,r}$	Matrice des inductances cycliques étoile 2-rotor
$L_{r,r}$	Matrice des inductances cycliques du rotor
$L_{r,s1}$	Matrice des inductances cycliques rotor-étoile 1
$L_{r,s2}$	Matrice des inductances cycliques rotor-étoile 2
L_m	Inductance mutuelle cyclique stator- rotor
L_{ms}	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique
L_{mr}	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique
L_{sr}	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotorique
L_a	Coefficient des inductances

M

min	Minute
M	Indice de modulation

N

n_{ph}	Nombre de phases des machines multiphasées
n_{pha}	Nombre équivalent de phases des machines multiphasées

P

p	Nombre de pair de pôles
-----	-------------------------

$P_{abs1,2}$	Puissances instantanées de la MASDE
$P_{em1,2}$	Puissances électromagnétiques de la MASDE
P	Operateur de Laplace
$P_{s1,2}$	Puissance active de l'étoile 1 et de l'étoile 2.
P_{em}	Puissance électromagnétique
$P_{em1,2}$	Puissance électromagnétique de l'étoile 1 et 2.
P_n	Puissance nominale
P_t	Puissance aérodynamique du vent
P_{opt}	Puissance mécanique optimale
Q	
$Q_{s1,2}$	Puissance réactive de l'étoile 1 et 2
R	
R_{s1}, R_{s2}, R_r	Résistance d'une phase de l'étoile 1, étoile 2 et du rotor
r	Coefficient de réglage en tension
R_T	Rayon de la turbine
S	
$sign$	Fonction logique de saturation
S	Surface de balayage de la turbine
T	
tr	Tours
t (<i>exposant</i>)	Transposé d'une matrice
T_v, T'_i	Fonction de connexion logique des interrupteurs d'un onduleur
t	Temps
T_p	Période de la porteuse triangulaire
T	Constante du temps d'une fonction de première ordre
U	
U_{dc}	Tension du bus continu
U_a	Tension d'alimentation de l'induit de la machine à courant continu
U_f	Tension d'alimentation de l'inducteur la machine à courant continu

V

v_{AB}, v_{BC}, v_{CA}	Tensions entre phase de l'onduleur
v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}	Tensions simple de l'onduleur
$v_{sa1}, v_{sb1}, v_{sc1}$	Tensions triphasées statoriques de l'étoile 1
$v_{sa2}, v_{sb2}, v_{sc2}$	Tensions triphasées statoriques de l'étoile 2
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Tensions triphasées rotoriques
$[v_{s1}], [v_{s2}], [v_r]$	Matrices des tensions statoriques et rotoriques
v_{ds1}, v_{qs1}	Tensions statoriques de l'étoile 1 dans le référence de Park (d, q)
v_{ds2}, v_{qs2}	Tensions statoriques de l'étoile 2 dans le référence de Park (d, q)
$v_{refa,b,c,1,2}$	Tensions de références sinusoïdales des onduleurs
V_m	Valeur crête des tensions de références des onduleurs
V_{pm}	Amplitude de la tension triangulaire de la porteuse
v_{ds1r}, v_{qs1r}	Tension de régulations des expressions de références de l'étoile 1
v_{ds2r}, v_{qs2r}	Tension de régulations des expressions de références de l'étoile 2
v_{ds1c}, v_{qs1c}	Tension de compensations des expressions de références de l'étoile 1
v_{ds2c}, v_{qs2c}	Tension de compensations des expressions de références de l'étoile 2
V_s	Vitesse du vent seuil
V_n	Vitesse du vent nominale
V_{max}	Vitesse du vent maximale
V_{vent}	Vitesse du vent

Alphabet grec

α	<i>Angle de décalage électrique entre étoiles de type 1 et entre phase de type 2</i>
α_m	<i>Angle de décalage mécanique entre étoiles de type 1 et entre phase de type 2</i>
β	<i>Angle de calage des pales</i>
$\varphi_{sa1}, \varphi_{sb1}, \varphi_{sc1}$	<i>Flux triphasés statoriques de l'étoile 1</i>
$\varphi_{sa2}, \varphi_{sb2}, \varphi_{sc2}$	<i>Flux triphasées statoriques de l'étoile 2</i>
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	<i>Flux triphasées rotoriques</i>
$[\varphi_{s1}], [\varphi_{s2}], [\varphi_r]$	<i>Matrices des flux statoriques et rotorique</i>

φ_f	<i>Flux d'excitation d'une machine à courant continu</i>
$\varphi_{md,q}$	<i>Flux magnétisant dans le repère de Park (d, q)</i>
φ_m	<i>Flux magnétisant total</i>
$\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}$	<i>Flux statorique de l'étoile 1 dans le repère de Park (d, q)</i>
$\varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$	<i>Flux statorique de l'étoile 2 dans le repère de Park (d, q)</i>
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	<i>Flux rotorique dans le repère de Park (d, q)</i>
$\varphi_{dg}, \varphi_{qg}$	<i>Flux d'entrefer dans le repère de Park (d, q)</i>
φ_g	<i>Flux d'entrefer total dans le repère de Park (d, q)</i>
φ_s	<i>Flux statorique total dans le repère de Park (d, q)</i>
φ_r	<i>Flux rotorique total dans le repère de Park (d, q)</i>
$\varphi_{d,q\ rest}$	<i>Flux rotorique (d, q) estimé dans le repère de Park (d, q)</i>
φ_{rest}	<i>Flux rotorique total estimé</i>
φ_n	<i>Flux nominal rotorique de la machine</i>
λ	<i>Rapport de vitesse</i>
$\lambda_{1,2}$	<i>Constantes d'inductances</i>
λ_{opt}	<i>Rapport de vitesse optimal</i>
μ	<i>Constantes d'inductances</i>
Ω_n	<i>Vitesse rotorique nominale de la machine</i>
Ω_t	<i>Vitesse angulaire de la turbine</i>
Ω_r	<i>Vitesse rotorique de la machine</i>
ω_{coord}	<i>Vitesse angulaire du référentielle de Park (d, q)</i>
ω_s	<i>Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statoriques</i>
ω_{mag}	<i>Energie électromagnétique</i>
ω_r	<i>Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotoriques</i>
ω_{gl}	<i>Pulsation électrique fondamentale de glissement</i>
ρ	<i>Densité de l'air</i>
θ_m	<i>Angle de position mécanique entre étoiles</i>
θ_e	<i>Angle de position électrique entre étoiles</i>
θ	<i>Angle de rotation dans le référentiel de Park (d, q)</i>
θ_r	<i>Angle de position rotorique</i>
τ_r	<i>Constante du temps électrique</i>
* (exposant)	<i>Symbole de référence</i>

Abréviations

AC	Alternating current
DC	Direct current
FOC	Field oriented control
F.T	Fonction de transfert.
GASDE	Générateur Asynchrone à Double Etoile
GS	Générateur synchrone
GW	Giga watt
GWEC	Global wind energy council
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MAS	Machine asynchrone
MASDE	Machine Asynchrone à Double Etoile
MCC	Machine à courant continu
MFOC	Modify field oriented control
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion
MPPT	Maximum power point tracking
MSAP	Machine asynchrone à aimants permanents
MW	Méga watt
PAC	Pile à combustible
PMSG	Permanent magnet synchronous generator
PI	Proportionnelle, intégrale
SEC	Static excitation controller
VFAC	Variable frequency Alternating current

Introduction Générale

La production de l'énergie électrique dans le monde génère des pollutions diverses. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables des rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifia suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air, par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement ou de transport.

Dans ce contexte, la recherche dans le domaine des énergies renouvelables est en plein développement depuis quelques années partout à travers le monde. Parmi les énergies renouvelables, on compte principalement les énergies hydraulique, photovoltaïque, éolienne, ainsi que la biomasse et la géothermie. De par son caractère pseudo-aléatoire, l'énergie éolienne pose beaucoup de défis afin d'avoir une production de puissance électrique constante et un facteur de puissance aussi proche que possible de l'unité. Deux approches sont possibles, à savoir un entraînement à vitesse constante et un entraînement à vitesse variable. La production d'énergie électrique à vitesse fixe est peu souhaitable, car le comportement dynamique en cas de défaut est potentiellement dangereux [POI03, GUE17].

La machine asynchrone présente l'avantage d'être robuste, de conception simple, et ne nécessite pratiquement pas d'entretien. Son prix est le plus bas du marché. La possibilité de contrôler son couple grâce à des commandes performantes a fait de la machine, une solution avantageuse en terme financier et en terme de maintenance [ADJ22, LUB03].

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone à double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées.

En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que la segmentation de puissance, la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotorique, la réduction des courants harmoniques et la grande fiabilité etc. [LEV06, BOJ06, KLI83, MER03, HAD06].

La commande vectorielle utilisée pour régler la vitesse de la machine (MASDE) rend la commande d'une telle machine similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Cette technique de commande a conduit à un changement radical dans la commande de la machine asynchrone, et cela grâce à la qualité des performances dynamiques qu'elle apporte.

Deux versions du contrôle vectoriel à flux orienté sont possibles [CAR95, CAN00]. La première version appelée « directe », nécessite la connaissance du module et de la phase du flux rotorique et la deuxième appelée « indirecte », où seule la position du flux rotorique est estimée. La version indirecte est largement étudiée pour sa simplicité de l'implémentation du fait qu'elle ne nécessite pas de capteur de flux comme la première [LOR88, MAR93].

Différentes configurations sont proposées dans la littérature afin de mettre en œuvre la machine à double étoile pour produire de la puissance constante et pour extraire le maximum d'énergie possible du vent.

Dans cette thèse, une nouvelle configuration de la machine asynchrone à double étoile sera proposée, étudiée et validée par des résultats de simulations. L'objectif principal est de produire une puissance constante à la charge dans un système éolien autonome. Pour ce faire, la thèse est répartie comme suit :

Dans le premier chapitre, des généralités sur les différentes configurations des systèmes éoliens, sur les diverses génératrices et sur les machines multiphasées et multi-étoiles seront présentées, tout en axant le travail sur la machine asynchrone à double étoile, objet de cette thèse, avant de conclure par la présentation des différentes configurations de la MASDE dans les systèmes éoliens autonome.

Le second chapitre traite la description et la modélisation de la machine asynchrone à double étoile avec des paramètres non identiques, où en premier lieu, est développé un modèle triphasé de la MASDE et en second lieu un modèle biphasé basé sur la transformation de Park. L'alimentation de la machine par des onduleurs de tensions à commande M.L.I est présentée, puis les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers sont commentés.

Le troisième chapitre est dédié à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la MASDE. Un aperçu est donné sur le principe de la commande vectorielle, ainsi qu'un rappel sur ses différentes méthodes, dont la commande indirecte et la commande directe appliquées sur une MASDE à paramètres non identiques.

Le quatrième chapitre présente une nouvelle configuration de la MASDE dont les paramètres et le mode de fonctionnement des deux étoiles sont complètement différents. La machine est pilotée à l'aide de la commande vectorielle à orientation du flux rotorique et appliquée dans un système éolien autonome muni d'un stockage par batteries chimiques. Après présentation des équations de la turbine éolienne, des simulations seront réalisées pour valider le modèle soit dans un fonctionnement normal à charge variable ou dans un fonctionnement à vitesse élevée.

Une conclusion générale couronnera cette étude où quelques perspectives de recherches seront exposées.

Chapitre I

Généralités sur les Aérogénérateurs

I.1 Introduction

La production d'énergie renouvelable est une technologie appropriée utilisée pour fournir localement de l'énergie aux clients, en particulier dans les régions isolées [HAM16]. Récemment, les systèmes de production d'énergie éolienne attirent une grande attention en tant que sources d'énergies renouvelables propres et sûres [HAM20].

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les systèmes éoliens, les différentes machines utilisées ainsi qu'une description des machines polyphasées dont la machine asynchrone à double étoile (MASDE), objet de notre travail seront présentés.

I.2 Etat de l'art des systèmes éoliens

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie éolienne n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [CAR01, POI03].

La capacité mondiale de production d'énergie éolienne installée dans le monde était de 824.874 MW en 2021 [STA18] l'équivalent de 889 réacteurs nucléaires. Selon l'association Wind Europe, l'énergie éolienne pourra fournir jusqu'à 35% des besoins en électricité de l'Union Européenne en 2030 [WIN18]. Les Nations Unis visent à couvrir 20% de leurs besoins en électricité par l'éolien en 2030 [NRE18]. L'Asie représente le plus grand marché pour l'énergie éolienne où la Chine, par exemple, vise à installer 400 GW d'ici 2030 et 1 000 GW en 2050 d'énergie éolienne [IEA18].

I.2.1 Production d'énergie éolienne en Algérie

Durant ces deux dernières décennies, la capacité de production électrique des éoliennes a connu une importante augmentation dans le monde. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité installée qui était de 487 GW en 2016, est passée à 534 GW en 2017. L'Allemagne, le Danemark et l'Espagne étaient les leaders dans l'installation de l'énergie éolienne avec une capacité totale de 153,7 GW avant que la Chine rentre en jeu avec 188. 232 GW représentant plus d'un quart de la puissance mondiale durant la même année.

Elle est devenue le leader de l'éolien, suivie par les États-Unis d'Amérique qui comptent 89 GW et l'Inde avec 32.85 GW. En Afrique, le développement de l'énergie éolienne reste faible avec 4.53GW, principalement installée en Afrique du Sud, en Égypte, au Maroc, en Tunisie et en Ethiopie qui cumule 324 MW fin 2017.

L'Algérie, par contre, accuse un retard important dans la course aux énergies éoliennes, bien qu'un programme gouvernemental ait été élaboré dans le plan d'action '2011-2030', dans l'objectif d'installation d'une puissance de 5.1 GW de source éolienne [CRE18]. A ce jour, une première et 'unique' ferme éolienne de 10 MW a été installée dans la région de Kabertene dans la wilaya d'Adrar.



Figure (I.1) : Première ferme éolienne en Algérie

I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'utilisation croissante et rapide de l'énergie éolienne dans le monde est liée aux multiples avantages qu'elle offre. Cette source d'énergie possède également des inconvénients qu'il faut prendre en compte, afin de trouver les moyens nécessaires de les minimiser.

I.2.2.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique et inépuisable. C'est une énergie respectueuse de l'environnement, ce qui offre aux générations futures la possibilité d'en bénéficier.

- L'installation des turbines éoliennes est relativement simple par rapport à celles des centrales aux énergies conventionnelles.
- C'est une source d'énergie universelle, puisqu'elle ne concerne pas seulement quelques pays comme dans le cas d'énergie pétrolière.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes de ligne dues aux longs transports d'énergie sont moindres. En outre, cette source d'énergie peut stimuler l'économie locale, en particulier dans les zones rurales.
- Outre l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seul 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

I.2.2.2 Inconvénients

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, ce qui nécessite le couplage avec d'autres sources d'énergies tels que les panneaux solaires photovoltaïques.
- Effet sur le paysage (esthétique), qui reste un sujet subjectif.
- Source bruyante, notamment, le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor qui doit être limitée.
- Interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- Qualité de la puissance électrique produite par les aérogénérateurs qui n'est pas constante.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.3 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.3.1 Eoliennes à axe horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontal sont les plus utilisés et ayant des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [MIR 05, IDJ10].

Ces turbines sont constituées de pales profilées à la manière des ailes d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [LEC04, POI03]. Les forces aérodynamiques appliquées sur les pales créent un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor de ce dispositif [DID 06, ROU15].



Figure (I.2) : Aérogénérateurs à axe horizontal

I.3.2 Eoliennes à axe vertical

Premier genre dans la conversion d'énergie éolienne où plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation [POI03, ROU15]. Nommée éolienne à axe vertical car son rotor est monté verticalement par rapport à la terre. Le principe aérodynamique permet un bon rendement pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible. Par contre, elle ne convient pas du tout pour les grandes puissances [IDJ10].



Figure (I.3) : Eolienne type « Darrieus »



Figure (I.4) : Eolienne type « Savonius »

Ces aérogénérateurs sont classés selon leurs caractéristiques aérodynamiques où en 1931, l'ingénieur français George Darrieus avait breveté son invention, conçues sur la base de la portance et en 1924, le finlandais Siguard Savonius, en se basant sur la traînée [GHE11].

I.4 Différentes configurations utilisées dans la conversion d'énergie éolienne

Les générateurs éoliens peuvent être classés selon la nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, à courant continu, etc.), le mode de régulation (PITCH ou STALL control), la nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe), le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable) ou le type du capteur (à axe horizontal ou vertical) [CHE15].

Les diverses configurations d'éoliennes en fonction de la vitesse de rotation et en fonction de leurs connexions ou non au réseau électrique seront présentées.

I.4.1 Eoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, deux types d'éoliennes raccordées au réseau électrique sont à recenser, à savoir, les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

La MADA et la MSAP sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [DAV07, IDJ10].

Le raccordement de l'éolienne au réseau électrique exige la même fréquence et la même tension que celles du réseau quel que soit la vitesse du vent, soit en gardant la vitesse de rotation de la génératrice constante par l'orientation des pales, soit par l'insertion d'un convertisseur statique [EPS 09, BOY 06, ROU15].

I.4.1.1 Eoliennes à vitesse fixe

La génératrice qui est, généralement, une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hyper-synchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance [MON12, WAN12, COU08].

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control) ou par une boîte à vitesse. Ce système maintient constante la vitesse de rotation de la machine, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [DAV07, IDJ10], figure (I.5) [CHE15].

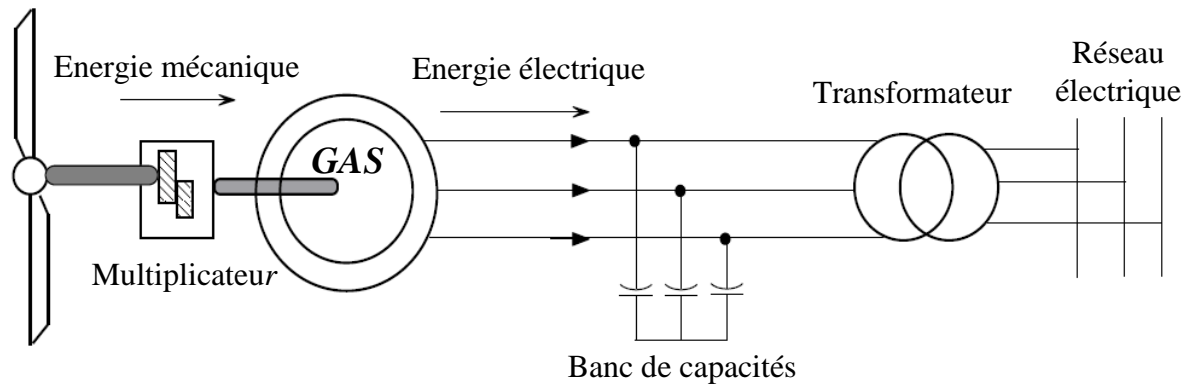


Figure (I.5) : *Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe et connecté au réseau*

Toutefois, la MAS à cage d'écurueil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, un banc de capacités lui est adjoit [POI03].

I.4.1.2 Eoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande [GHE11, CHA02]. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par la création d'un bus continu intermédiaire [CHE15].

Les avantages de cette configuration se résument par [CAM03, PEN96] :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale.

L'utilisation de convertisseur de puissance « complexe » demeure son principal inconvénient.

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour les différentes vitesses du vent est illustré par la figure (I.6) [GHE11], elle montre clairement qu'afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

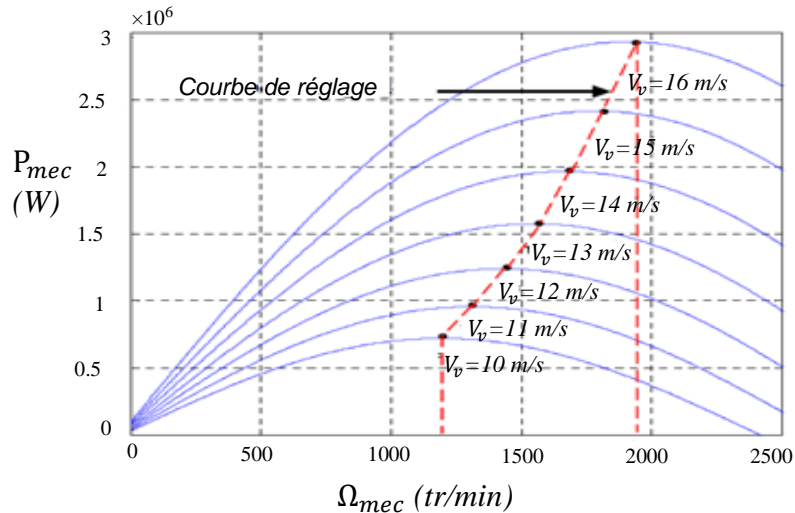


Figure (I.6) : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques [IDJ10] tels que :

a) Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage est la plus utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne grâce à sa réversibilité, sa robustesse, son faible coût de construction vue l'absence du système de contact glissant qui ne nécessite que peu d'entretien et sa facilité de connexion au réseau. Ces caractéristiques ont permis la fabrication en grandes quantités et à très grande échelle de puissances de ce type de machines [ROU15], figure (I.7) [GHE11].

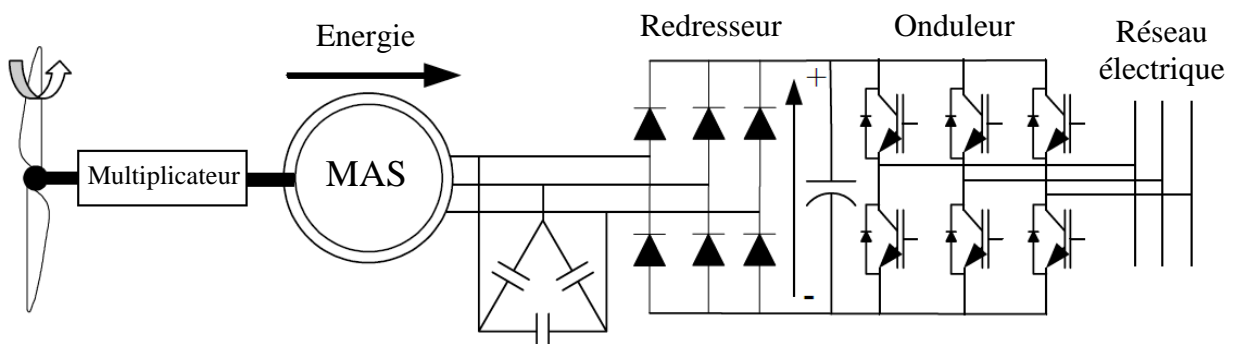


Figure (I.7) : Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

b) *Machine asynchrone à double étoile*

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double étoile [POI03]. Des études de la MASDE [CHE15, AMI12, HAD01] ont montré ses avantages en termes de robustesse, de fiabilité et surtout de la qualité d'énergie en éliminant les harmoniques 5 et 7 du temps, ce qui fera diminuer les vibrations du couple et augmenter son rendement, figure (I.8) [AMI12].

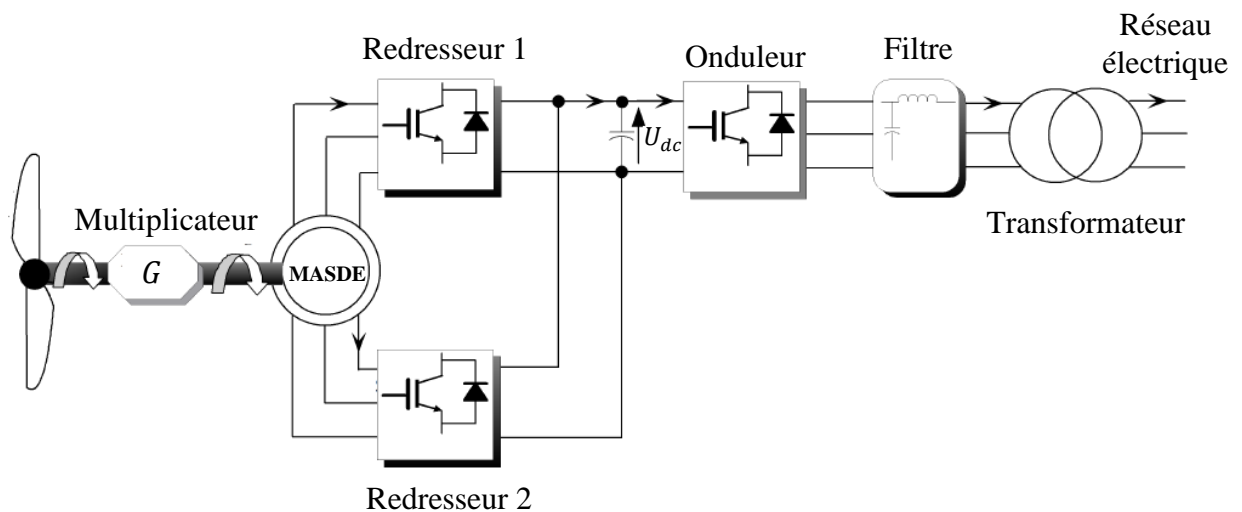


Figure (I.8) : *Génératrice asynchrone à double étoile reliée au réseau électrique*

c) *Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné*

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [POI03]. La machine a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne [GHE11]. Son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes.

Une des solutions très intéressantes dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur et l'autre en mode onduleur triphasé, figure (I.9) [ABD07, IDJ10].

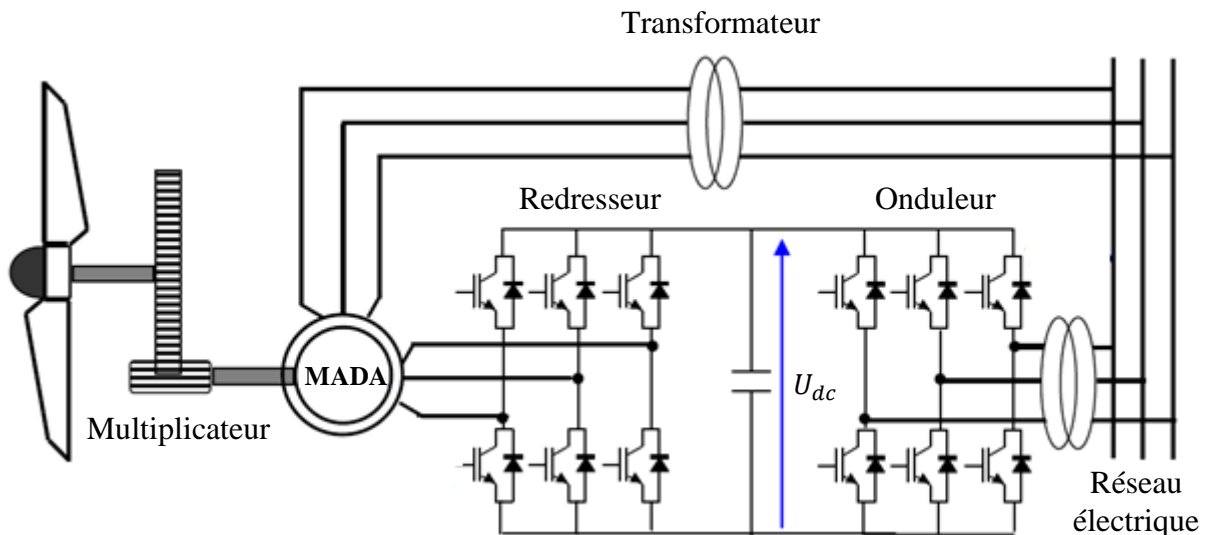


Figure (I.9) : *Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable*

Le fonctionnement en hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [MAC89, KEL00, DAT02]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des variations de tensions importantes dans l'enroulement rotorique et faire circuler des courants de fréquences élevées dans ces mêmes enroulements [POI03].

d) Machine synchrone à rotor bobine

L'avantage du générateur synchrone (GS) réside dans l'absence du courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique est obtenu par un bobinage d'excitation conventionnel [CHE15].

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au travers de l'onduleur souvent à MLI. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles [DAV07].

Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable, figure (I.10) [POI03] [ABD07].

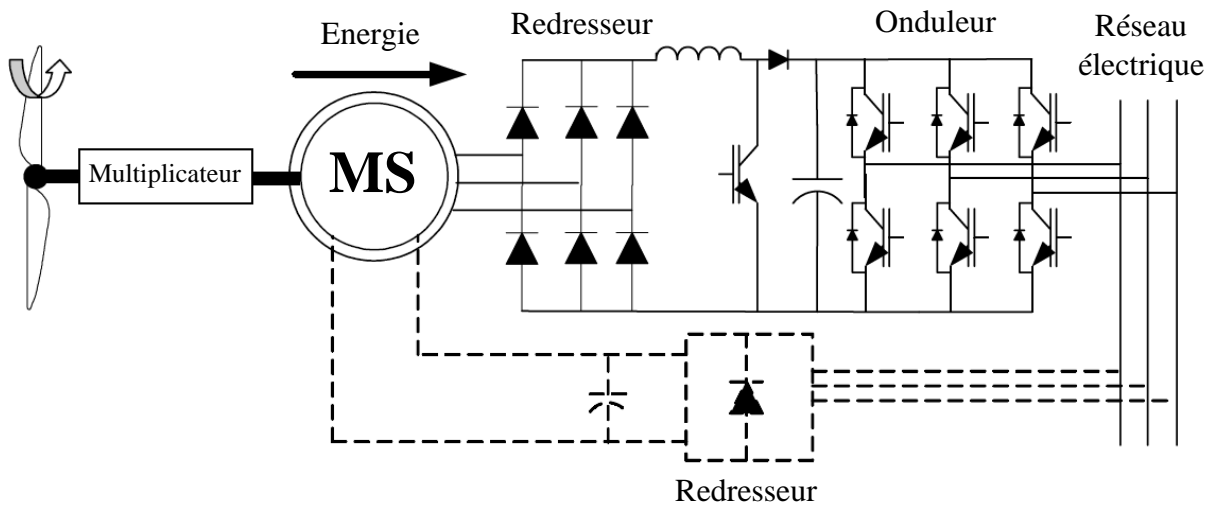


Figure (I.10) : Machine synchrone à rotor bobiné reliée au réseau

e) *Machine synchrone à aimant permanent*

Les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG) suscitent de plus en plus d'intérêt, car ils sont excités magnétiquement (auto-excités) et présentent un rendement et un facteur de puissance élevés.

Le stator est constitué d'un enroulement triphasé et le rotor d'aimants permanents de forme rectangulaire ou cylindrique [OTM21]. La suppression du système de balais - bagues et du multiplicateur de l'éolienne permet de minimiser les frais d'entretien du système. De plus, la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, figure (I.11) [IDJ10]. Il existe plusieurs types de ces machines destinées aux applications éoliennes comme les machines de construction standards (radiales), les génératrices discoïdes (champs axial) et les machines à rotor extérieur [WEN08, ERR12].

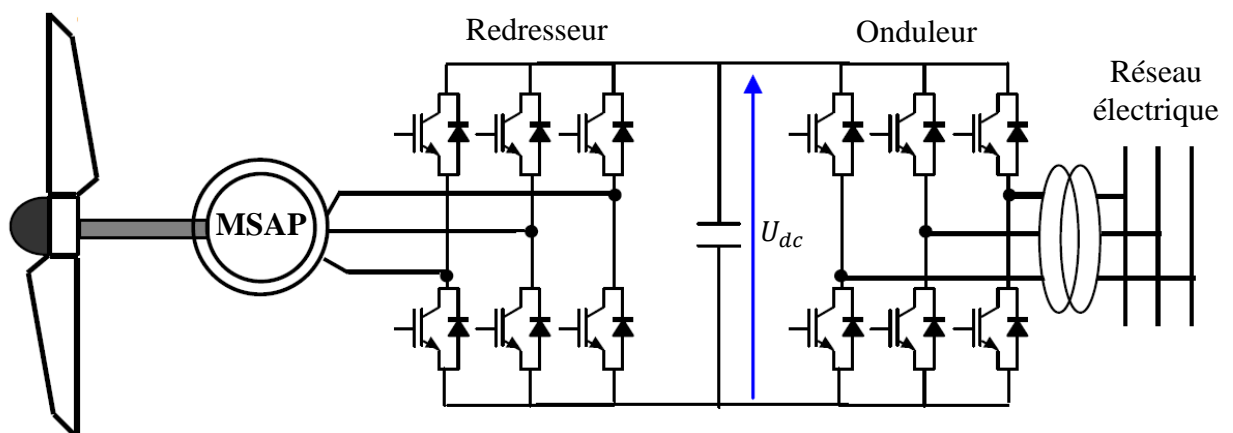


Figure (I.11) : Machine synchrone à aimant permanent

I.4.2 Eoliennes en fonctionnement autonome

De plus en plus d'applications ne peuvent pas être reliées au réseau à cause de la complexité de la connexion ou du coût d'installation. Pour autant, il est souvent indispensable d'avoir accès à l'électricité afin d'assurer quelques services de base comme l'éclairage ou l'alimentation d'un dispositif électrique. Ces sites peuvent alors être alimentés en électricité par l'énergie renouvelable. Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique [IDJ10], la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de par leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [SEY03, FAR05]. Ces actionneurs sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation [IDJ08].

Les différentes configurations des aérogénérateurs en fonctionnement autonome sont généralement :

I.4.2.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

a) Machine synchrone à rotor bobiné

Le rotor de ce type de machine fait appel, le plus souvent, à une source de tension continue pour l'excitation de la machine, par conséquent la présence d'une batterie ou d'une alimentation indépendante est nécessaire dans le cas d'un système autonome [MIR05, IDJ10].

b) Machine synchrone à aimants permanents

Contrairement aux machines synchrones à rotor bobiné, les machines à aimants permanents ne nécessitent pas d'alimentation au rotor et elles sont bien adaptées au fonctionnement autonome vue ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique). Les inconvénients liés au coût plus élevé que les machines asynchrones et le flux d'excitation non réglable demeurent non négligeables. Toutefois, ils existent des différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance.

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (I.12), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [LEC04].

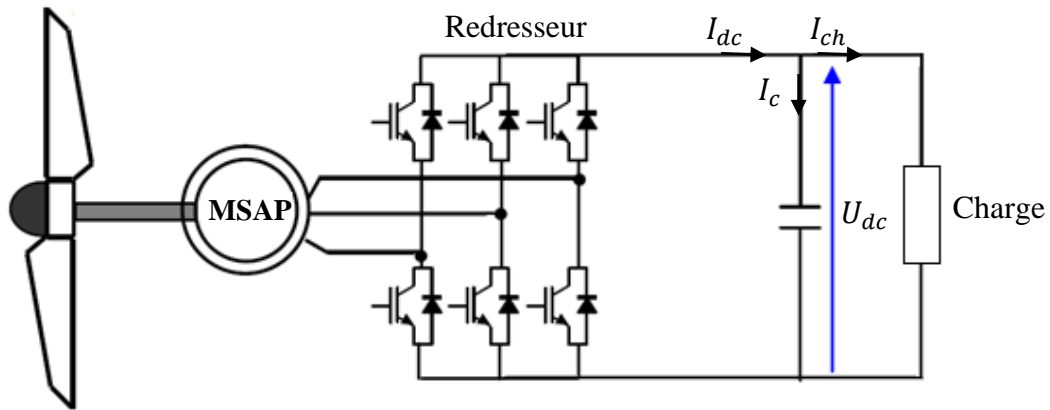


Figure (I.12) : Machine synchrone connectée à un redresseur MLI

I.4.2.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage reste incontestablement celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par balais-collecteurs et d'aimants permanents, ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égales [El-AIM 04] et également un coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance [CAM03]. Son principal inconvénient demeure sa consommation de l'énergie réactive nécessaire à sa magnétisation [REK05-a].

Toutefois, en fonctionnement autonome, la valeur de la charge n'étant pas fixe, la tension statorique peut varier dans de grandes proportions. Il devient alors nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de maintenir la tension de sortie à une amplitude et une fréquence constantes [IDJ08] (figure I.13).

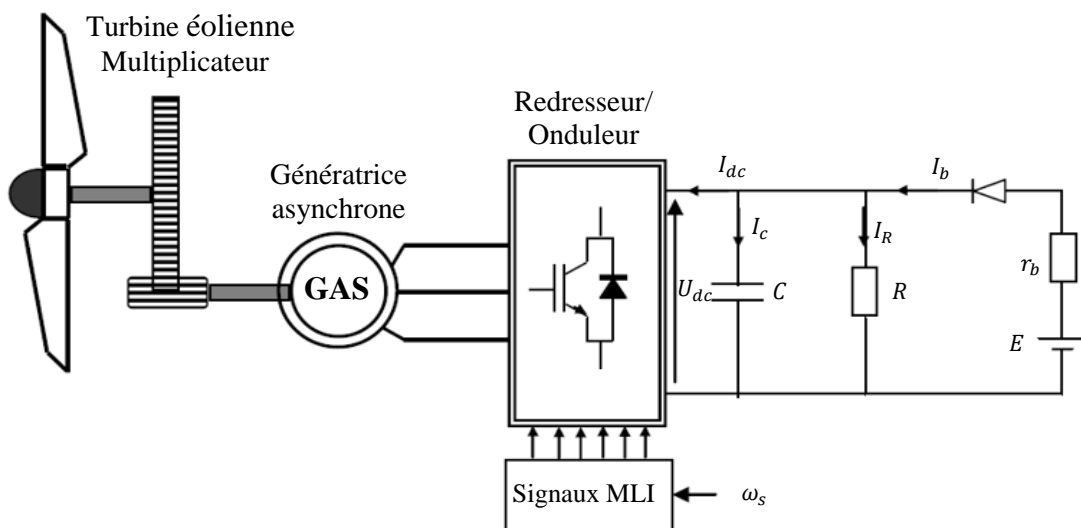


Figure (I.13) : Machine asynchrone dans un système autonome

I.5 Différents systèmes de stockage

Les systèmes de stockage d'énergie sont des éléments essentiels dans les systèmes énergétiques et notamment ceux qui se situent dans les sites isolés. Lorsque les sources d'énergies produisent plus que la demande, l'excédent d'énergie sera stocké. L'énergie stockée sera exploitée lorsque les sources d'énergie sont hors service ou en état de production insuffisante. Il existe une diversité de système de stockage tels que des batteries, des barrages hydrauliques, des supercondensateurs, des piles à combustible, des volants d'inertie, etc.

I.5.1 Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'eau

C'est la plus ancienne technologie de stockage d'énergie, utilisée depuis 1929 [CIM05]. Un tel système comporte deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes. L'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur, où elle est stockée.

En fonction de la demande, l'eau peut revenir au réservoir inférieur, mais en traversant une ou plusieurs turbines hydrauliques transformant l'énergie mécanique en énergie électrique comme illustrée par la figure (I.14).

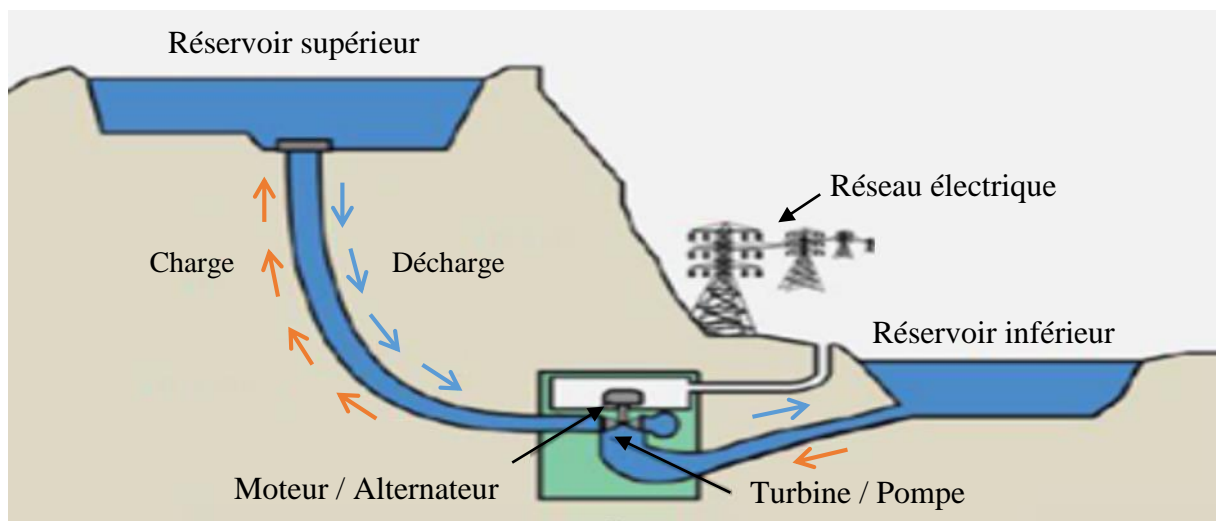


Figure (I.14) : Schéma de principe d'une STEP à conduite souterraine

I.5.2 Stockage électrochimique

I.5.2.1 Batteries électrochimiques

Les batteries d'accumulateurs sont les composants les plus connus et les plus utilisés pour un stockage électrochimique de faibles dimensions [MOS03, HEL19].

En fonction du type de batterie, des différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique.

En fonction de la demande, des réactions inversées produisent de l'électricité. L'accumulateur au plomb est le plus utilisé où plusieurs améliorations le rendent encore compétitif par rapport aux autres procédés. La plage de puissance est très étendue, de quelques Watt jusqu'aux modules de quelques MW [CIM05].

I.5.2.2 Supercondensateurs

Les supercondensateurs s'apparentent à des condensateurs possédant une très grande capacité. Ils sont constitués d'un électrolyte séparant deux électrodes fabriquées par un matériau poreux comme le charbon actif, afin d'en démultiplier la surface spécifique [HEL19].

Son principe de fonctionnement est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. Un supercondensateur possède une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1F à 5000 F).

Les condensateurs électrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries ou à la pile à combustible [GUA04].

I.5.2.3 Stockage d'énergie sous forme d'hydrogène

Le principal représentant de ce type de stockage est l'électrolyse de l'eau qui permet de produire de l'hydrogène. Contrairement au stockage en accumulateurs, ce type de système permet une conservation plus longue, inter-saisonnière, de l'énergie sous forme d'hydrogène (figure I.15).

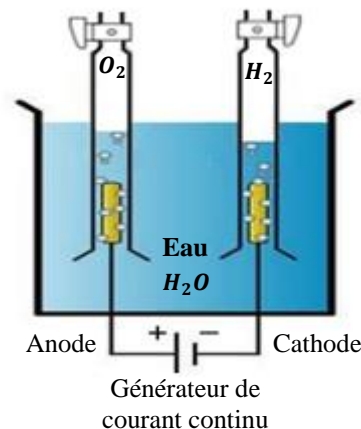


Figure (I.15) : Principe de l'électrolyse de l'eau

L'hydrogène comme carburant peut ensuite être valorisé via une pile à combustible (PAC) qui fera réagir 2 molécules de H_2 avec une molécule de dioxygène pour produire de l'électricité avec un rendement de $\pm 60\%$ et rejeter de l'eau. Ce rendement sera meilleur si la pile à combustible est utilisée en cogénération pour valoriser le dégagement de chaleur [DAH15] [ADJ22].

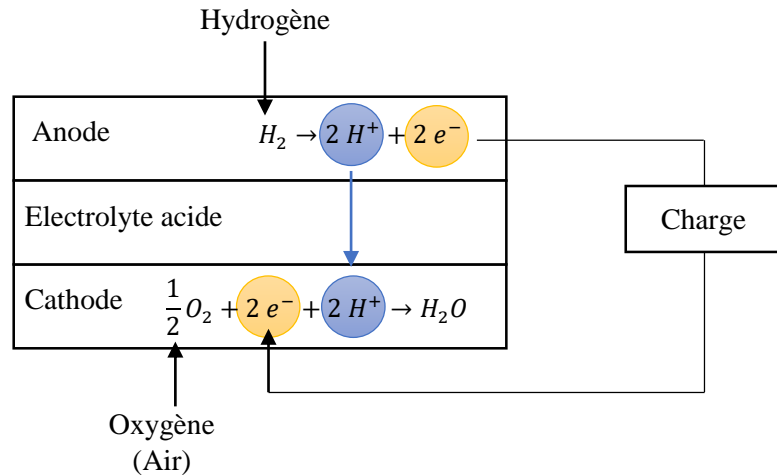


Figure (I.16) : Réaction de base d'une pile à combustible

I.5.3 Volants d'inertie

Le fonctionnement de système de stockage inertiel est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela, un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier laps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle, dans ce cas le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation, puis à la demande, l'énergie stockée est restituée par la même machine sous forme d'énergie électrique [TAR08].

I.6 Généralités sur les machines multiphasées

Les machines triphasées à courant alternatif dominant assez largement le domaine des machines électriques, mais depuis longtemps déjà, on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [AMI12, HAM13].

Selon le nombre de phases statorique, on distingue deux types de machines multiphasées, celles dont le nombre de phases est multiple ou non multiple de trois. Le premier type s'appelle la machine multi-étoile, le deuxième type regroupe le reste des machines où le nombre de phases est pair ou impair [MER13].

I.6.1 Machines multiphasées de type 1

Les machines multiphasées de type 1, (figure I.17), sont des machines dont le nombre de phases est multiple de trois, ces machines sont souvent appelées machines multi-étoiles. On note n_{ph} pour le nombre de phases, donc on a $n_{ph} = 3i$, ($i = 1, 2, 3, \dots$). Les neutres des machines multi-étoiles sont de préférence isolés dans le fonctionnement normal.

Pour un nombre de phases données, il est possible d'avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes (décalage entre étoiles). En effet, une machine double étoile (6 phases) de $\alpha = 0^\circ$ a des caractéristiques différentes de celle d'une machine double étoile de $\alpha = 30^\circ$, celle-ci a des caractéristiques différentes de celle d'une machine dont les deux étoiles sont décalées de $\alpha = 60^\circ$.

Pour discriminer les différentes configurations possibles, le terme « nombre équivalent de phases » (en anglais number of phase belts per pole) a été introduit dans la littérature, on le note $n_{ph\alpha}$ et est défini comme suit: $n_{ph\alpha} = \frac{\pi}{\alpha}$.

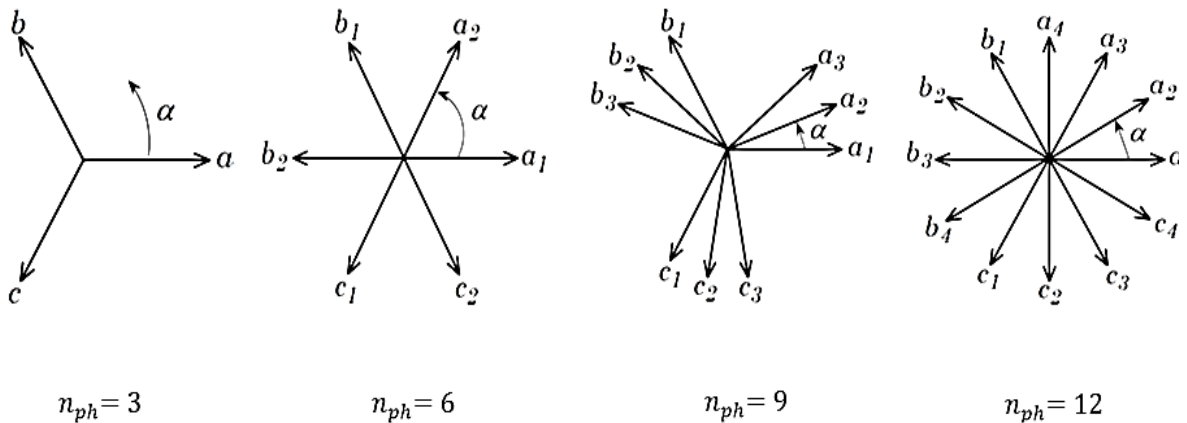


Figure (I.17) : Représentation vectorielle des machines multiphasées de type 1

Parmi les machines les plus connues de cette configuration, la machine asynchrone à double étoile (MASDE), robuste, fiable qui répond à de meilleurs critères de performances et un rendement plus élevé par rapport à la machine ordinaire (une seule étoile).

I.6.2 Machines multiphasées de type 2

Le second type est constitué des machines possédant un nombre de phases statoriques qui contrairement au type précédent n'est pas un multiple de trois.

Pour les machines ayant un nombre de phases impair, les phases sont régulièrement décalées de $2\pi/n_{ph} = 2\alpha$. On a donc le nombre de phases égal au nombre équivalent de phases $n_{ph} = n_{ph\alpha} = \pi/\alpha$.

La figure I.18 donne quelques exemples de déphasage de machines multiphasées de type 2 [KLI83, SIN02, KIY20].

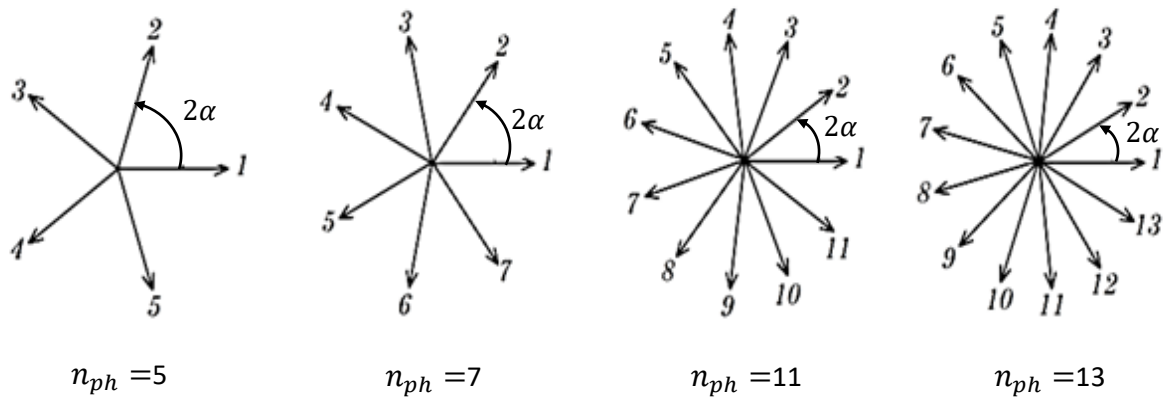


Figure (I.18) : Représentation vectorielle des machines multiphasées de type 2.

I.6.3 Avantages des machines multiphasées

Les machines multiphasées ont un très grand intérêt pour les différentes raisons :

❖ *Segmentation de puissance*

La segmentation de puissance est l'avantage principal des machines multiphasées. A puissance donnée, lorsque le nombre de phases est augmenté, on diminue le courant par phase sans autant augmenter la tension (ou vice versa). La puissance totale est donc répartie sur un nombre de phases plus important, ce qui réduit la puissance demandée par chacune d'elles. 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 élevées, comme les semi-conducteurs de puissance de type IGBT. Cela permet de minimiser les ondulations du courant et du couple [AMI12, CHE15, HAM20, MER13, LEV12, KIY20].

❖ *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 sur uniquement deux phases, ce qui produit une perte de contrôle ainsi que des ondulations du couple de fortes amplitudes.

Dans le cas des machines multiphasées, 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. Mais avec un couple électromagnétique moindre par rapport à celui développer en régime normal [PAN99, ARO07].

Pour un bon fonctionnement de l'ensemble machine multiphasées-convertisseurs statiques, chaque étoile d'une machine de type 1 doit être alimentée par son propre convertisseur statique triphasé, et chaque phase d'une machine de type 2 est alimentée par son propre convertisseur statique monophasé [MER13].

❖ *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 avec un déphasage entre étoile de $\alpha = 30^\circ$, 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 multiphasées 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 multiphasée aura pratiquement toujours moins de pertes rotoriques qu'une machine triphasée.

❖ *Élimination d'harmoniques d'espace*

Plus la valeur de $n_{ph\alpha}$ (nombre équivalent de phase) dont ($n_{ph\alpha} = \pi/\alpha$) 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].

I.6.4 Inconvénients des machines multiphasées

- Le coût : Le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine [HAD01].
- Apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension [SIN02].
- Il est nécessaire de développer des techniques de commande pour les convertisseurs statiques spécifiés et adaptés pour les machines multiphasées de type 2, puisque les méthodes

élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes multiphasés de type 2 [SIN02, HAD20].

I.6.5 Différentes configurations des génératrices asynchrones à double étoile dans un système autonome

La configuration la plus utilisée de la machine asynchrone à double étoile est la génération de puissance par les deux étoiles connectées à des redresseurs commandés puis à un onduleur alimentant une charge triphasée [CHE15, HAM16], ces deux étoiles ont les mêmes paramètres avec un fonctionnement identique, figure (I.19).

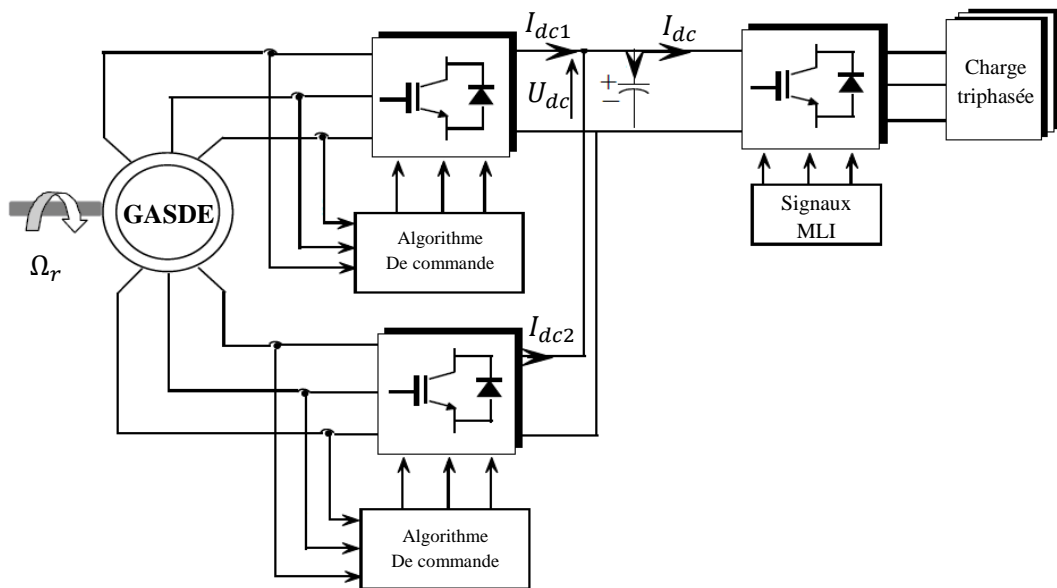


Figure (I.19) : Machine à double étoile dans un fonctionnement autonome

Une autre configuration est proposée par [FEI12], les deux étoiles ont des paramètres et des fonctionnements différents. La première étoile alimente une charge triphasée à fréquence variable VFAC et la deuxième étoile alimente une charge continue DC via un convertisseur de tension statique SEC et une batterie de stockage chimique et régule la valeur de la tension du circuit de puissance par variation du flux d'entrefer.

Dans cette configuration, la charge triphasée alternative AC doit être insensible à la fréquence d'alimentation (figure I.20).

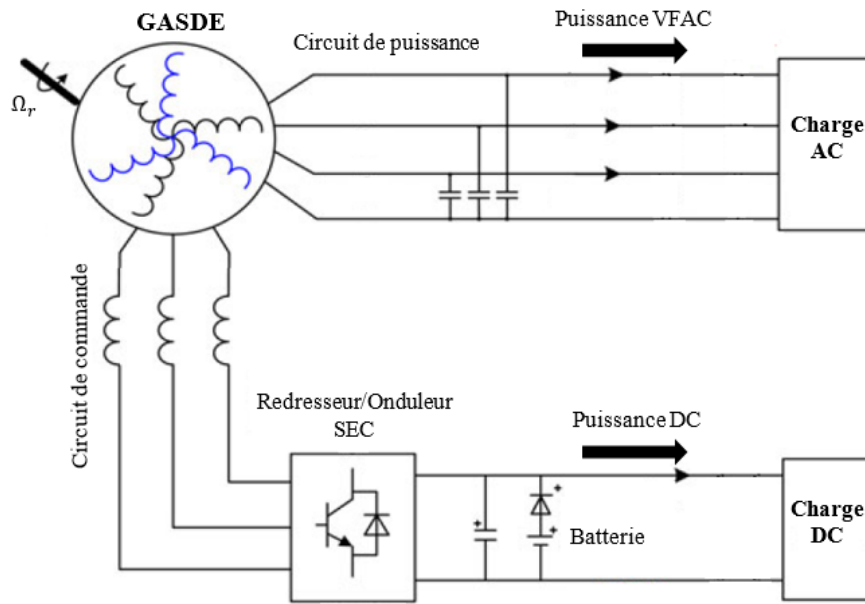


Figure (I.20) : Machine à double étoile à paramètres non identiques relié à deux charges autonomes

[FEI14] a proposé une configuration où le circuit de puissance est connecté à une charge triphasée à fréquence variable (VFAC), et le circuit de commande est connecté à un contrôleur statique d'excitation (SEC) composé d'un banc de condensateurs et d'une batterie. La régulation de la tension de circuit de puissance est Basé sur la loi de modification de la puissance réactive fournie par l'enroulement de commande et sur la technique de contrôle de la fréquence de glissement afin de maintenir la tension alternative constante (figure I.21), un dispositif bien adapté pour les systèmes embarqués et les dispositifs militaires.

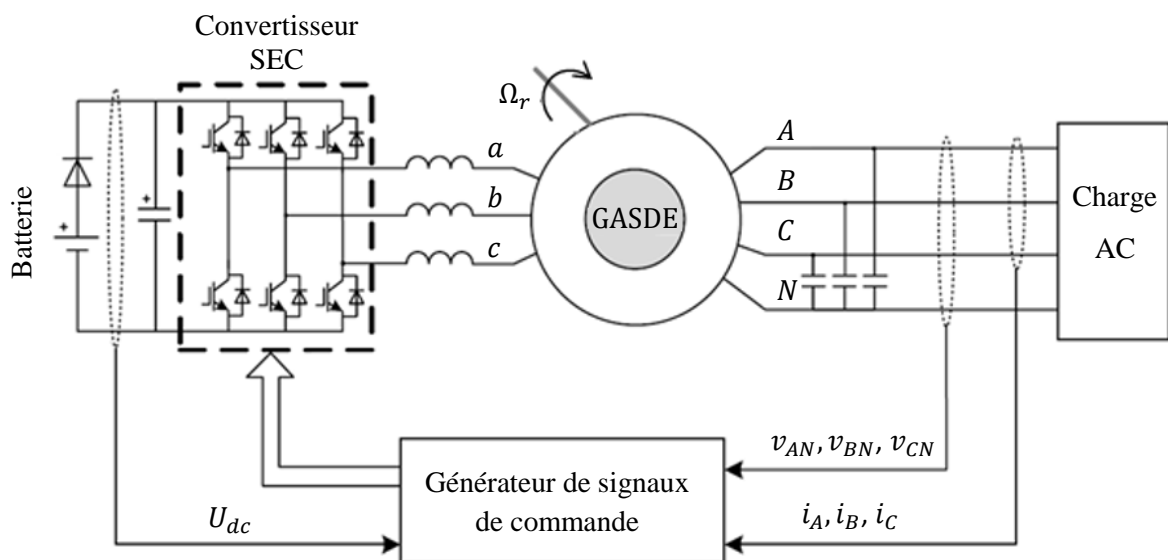


Figure (I.21) : Schéma de configuration d'une machine à double étoile à paramètres non identiques relié à une charge autonome et un régulateur de puissance réactive

La configuration qui sera présentée dans cette thèse, est celle d'un générateur à double étoile à paramètres non identiques avec un fonctionnement différent. La première étoile fournit de la puissance électromagnétique à la charge autonome et la deuxième étoile sera utilisée pour charger un banc de batterie pour le stockage à vitesse nominale et la restitution de cette énergie pour l'alimentation en puissance de la première étoile dans le cas de faible vitesse du vent, cette technique nous permet une régulation de la puissance dans un fonctionnement à vitesse variable et pour différentes valeurs de la charge.

I.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les systèmes éoliens, en présentant les différents gisements au niveau planétaire et évidemment en Algérie. Les différentes structures des éoliennes, les différents types de fonctionnement et les dispositifs aérogénérateurs utilisés pour la conversion de l'énergie du vent en énergie électrique sont ainsi étalés.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté les différents types de machines multiphasées, les avantages qu'elles apportent par rapport aux autres machines conventionnelles dont la machine asynchrone à double étoile (MASDE) qui sera l'objet de notre recherche. Pour entamer notre travail, un aperçu est donné sur les différentes configurations de la machine asynchrone à double étoile étudiées auparavant pour mieux positionner notre contribution par rapport à ce qui est déjà été effectué.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) et son alimentation par deux onduleurs triphasée à commande MLI.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

II .1 Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on nomme la modélisation. Il est donc évident, que cette étape soit un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commandes performants [AZI09].

La modélisation de la machine est basée sur la théorie unifiée des machines électriques classiques, dite encore théorie généralisée. Cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à deux axes perpendiculaires (direct et en quadrature) [CRE97].

Après une description de la MASDE, sa modélisation est effectuée dans un premier laps de temps avant de pouvoir alimenter les stators des deux étoiles considérées identiques et puis non identiques par des onduleurs de tension à commande MLI. L'étude va s'effectuer avec un décalage angulaire $\alpha_e = 30^\circ$ et les résultats de simulations seront présentés et commentés.

II.2 Description de la machine asynchrone à double étoile

Le stator de la machine asynchrone à double étoile porte deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique « $\alpha_e = 30^\circ$ » et d'un angle mécanique « α_m », et son rotor peut être soit bobiné, soit à cage d'écureuil comme est le cas pour cette application.

Pour simplifier l'étude, les circuits électriques du rotor sont équivalents à un enroulement triphasé en court-circuit [HAD01].

Les grandeurs relatives à la première étoile sont indexées par '1' et celles relatives à la deuxième étoile par '2'.

La figure (II.1) reflète la représentation schématique de la machine asynchrone à double étoile où les angles θ_r et $(\theta_r - \alpha)$ représentent respectivement les positions du rotor (phase a_r), par rapport à la première étoile (phase a_{s1}) et à la deuxième étoile (phase a_{s2}).

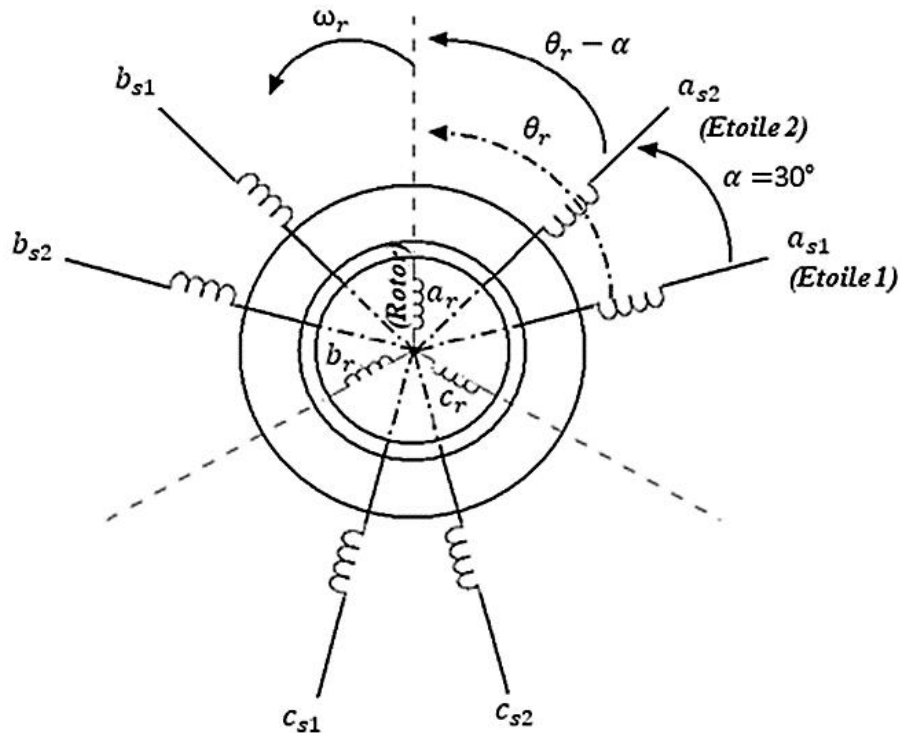


Figure (II.1) : Représentation schématique des enroulements de la MASDE

II.3 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour pouvoir le commander.

La machine asynchrone à double étoile n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement d'où la nécessité de prendre en compte quelques hypothèses simplificatrices [ALL05].

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour cette étude, les hypothèses suivantes sont à considérer :

- La machine est de constitution symétrique ;
- Force magnétomotrice est à répartition spatiale sinusoïdale ;
- Le circuit magnétique est non saturé ;
- Les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont négligées ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température
- L'effet de peau est négligé ;
- L'entrefer est uniforme.

II.3.2 Modèle de la machine asynchrone à double étoile

II.3.2.1 Equations électriques

Les équations des tensions de la machine asynchrone à double étoile représentent pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et de la chute inductive dues au flux [HAD01, AMI08, CHE11].

a) Première étoile

$$\begin{cases} v_{sa1} = R_{s1}i_{sa1} + \frac{d}{dt}\varphi_{sa1} \\ v_{sb1} = R_{s1}i_{sb1} + \frac{d}{dt}\varphi_{sb1} \\ v_{sc1} = R_{s1}i_{sc1} + \frac{d}{dt}\varphi_{sc1} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

b) Deuxième étoile

$$\begin{cases} v_{sa2} = R_{s2}i_{sa2} + \frac{d}{dt}\varphi_{sa2} \\ v_{sb2} = R_{s2}i_{sb2} + \frac{d}{dt}\varphi_{sb2} \\ v_{sc2} = R_{s2}i_{sc2} + \frac{d}{dt}\varphi_{sc2} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

c) Rotor

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt}\varphi_{ra} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt}\varphi_{rb} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt}\varphi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Les équations peuvent être représentées sous forme matricielle :

$$[v_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s1}] \quad (\text{II.4})$$

$$[v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s2}] \quad (\text{II.5})$$

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [v_{s1}] &= [v_{sa1} \ v_{sb1} \ v_{sc1}]^t; & [v_{s2}] &= [v_{sa2} \ v_{sb2} \ v_{sc2}]^t; & [v_r] &= [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^t; \\ [i_{s1}] &= [i_{sa1} \ i_{sb1} \ i_{sc1}]^t; & [i_{s2}] &= [i_{sa2} \ i_{sb2} \ i_{sc2}]^t; & [i_r] &= [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t; \\ [\varphi_{s1}] &= [\varphi_{sa1} \ \varphi_{sb1} \ \varphi_{sc1}]^t; & [\varphi_{s2}] &= [\varphi_{sa2} \ \varphi_{sb2} \ \varphi_{sc2}]^t; & [\varphi_r] &= [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^t; \end{aligned}$$

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}; \quad [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}.$$

II.3.2.2 Equations magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} [\varphi_{s1}] \\ [\varphi_{s2}] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

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

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

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

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

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

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

Le reste des sous matrices sont : $[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$, $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$, $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$.

II.3.2.3 Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique total de la machine est donnée par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle mécanique.

$$C_{emt} = \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_m} = p \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_e} \quad (\text{II.8})$$

Tel que : $C_{emt} = C_{em1} + C_{em2}$

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

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.9})$$

D'où :

$$C_{emt} = \left(\frac{p}{2}\right) \left([i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t \right) \quad (\text{II.10})$$

Les deux expressions du couple de chaque étoile sont :

$$\begin{cases} C_{em1} = \left(\frac{p}{2}\right) \left([i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [i_r]^t \right) \\ C_{em2} = \left(\frac{p}{2}\right) \left([i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t \right) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.3.2.4 Equation mécanique

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

$$C_{em1} + C_{em2} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + K_f \Omega_r \quad (\text{II.12})$$

Où : $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$

II.3.3 Modèle biphasée de la MASDE

Le modèle réel de la MASDE est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation θ . La transformation de Park permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants, en transformant les enroulements statorique et rotorique en enroulements orthogonaux équivalents.

II.3.3.1 Transformation de Park

La transformation de Park rend assez aisée l'étude de tous les régimes transitoires de la machine électrique polyphasée. Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courants, tensions et flux) d'indice réelles « a,b,c » par des grandeurs d'indices « d,q,o » (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park.

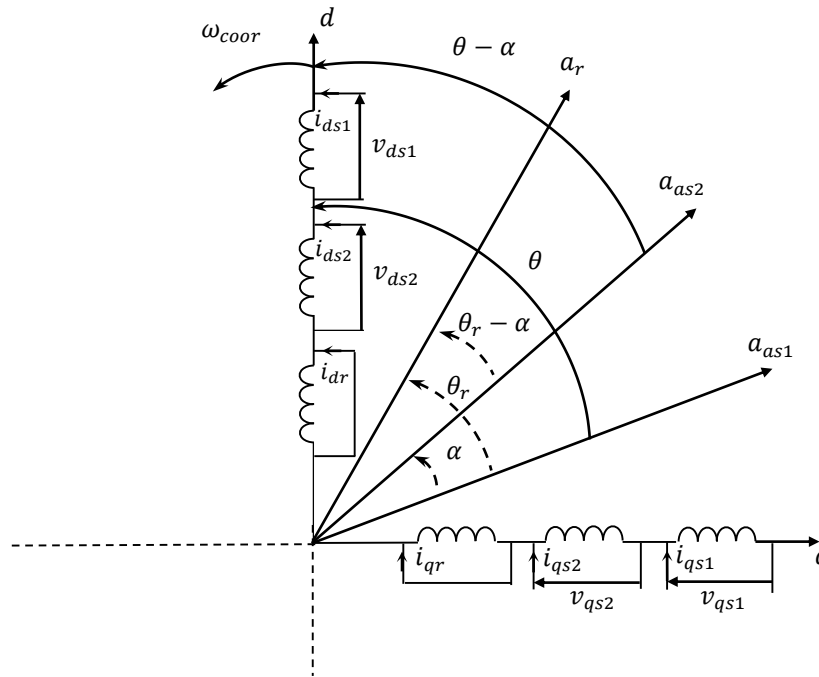


Figure (II.2) : Représentation schématique de modèle de Park de la MASDE

La matrice de Park pour l'étoile 1 est défini comme suit :

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

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

$$[P(\theta - \alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[P(\theta_{gl})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.3.3.2 Choix du référentiel

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

a) Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coor} = 0$). Ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

b) Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor ($\omega_{coor} = \omega_r$). Ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones où la vitesse de rotation est considérée constante.

c) Référentiel lié au champ tournant

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statorique ($\omega_{coor} = \omega_s$).

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple puisque ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques. Dans notre étude, le modèle est exprimé dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

II.3.3.3 Equations électriques et magnétiques

En appliquant la transformation de Park aux équations électriques et magnétiques de la machine, on aura le système d'équations suivant [CHE11] :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - \omega_s\varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs1} + \omega_s\varphi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs2} + \omega_s\varphi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} + \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

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

Les composantes des flux statorique et rotorique sont exprimées par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

II.3.3.4 Puissances absorbées et couples électromagnétiques

La transformation de PARK repose sur l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de transformation, ce qui, de toute évidence, conduit à leur équivalence physique. En négligeant les composantes homopolaires, les puissances absorbées par la MASDE dans le système d'axe (d, q) sont exprimées par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{abs1} = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} \\ P_{abs2} = v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant les expressions de tensions (v_{ds1} , v_{qs1} , v_{ds2} , v_{qs2}) par leurs expressions dans (II.16), on trouve :

$$\begin{cases} P_{abs1} = (R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds1}}{dt}i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt}i_{qs1} \right) + \omega_s(\varphi_{ds1}i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1}) \\ P_{abs2} = (R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds2}}{dt}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt}i_{qs2} \right) + \omega_s(\varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Ces expressions 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 représente les puissances électromagnétiques P_{em1} et P_{em2} .

Sachant que :

$$\begin{cases} P_{em1} = \omega_s(\varphi_{ds1}i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1}) \\ P_{em2} = \omega_s(\varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Et} \quad \begin{cases} C_{em1} = \frac{P_{em1}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em1}}{\omega_s} \\ C_{em2} = \frac{P_{em2}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em2}}{\omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant par les expressions des puissances électromagnétiques, on aura :

$$\begin{cases} C_{em1} = p(\varphi_{ds1}i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1}) \\ C_{em2} = p(\varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant les expressions des flux (φ_{ds1} , φ_{qs1} , φ_{ds2} , φ_{qs2}) données par (II.17) dans les expressions données par (II.22), on obtient :

$$\begin{cases} C_{em1} = pL_m(i_{qs1}i_{dr} - i_{ds1}i_{qr}) \\ C_{em2} = pL_m(i_{qs2}i_{dr} - i_{ds2}i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

A partir des expressions des flux rotorique (φ_{dr} et φ_{qr}) exprimées dans (2.17), on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II.24})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{II.25})$$

En introduisant les expressions des courants (i_{dr} et i_{qr}) dans les expressions des couples électromagnétiques (II.23), on obtient :

$$\begin{cases} C_{em1} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1}\varphi_{dr} - i_{ds1}\varphi_{qr}) \\ C_{em2} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs2}\varphi_{dr} - i_{ds2}\varphi_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.3.4 Représentation d'état de la MASDE

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous forme :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$X = [\varphi_{ds1} \ \varphi_{qs1} \ \varphi_{ds2} \ \varphi_{qs2} \ \varphi_{dr} \ \varphi_{qr}]^t \quad : \text{ Vecteur d'état.}$$

$$U = [v_{ds1} \ v_{qs1} \ v_{ds2} \ v_{qs2} \ 0 \ 0]^t \quad : \text{ Vecteur d'entrée.}$$

Le flux magnétisant φ_m est la somme des deux flux magnétisants direct φ_{md} et en quadrature φ_{mq} d'où :

$$\varphi_m = \sqrt{\varphi_{md}^2 + \varphi_{mq}^2} \quad (\text{II.28})$$

A partir des systèmes d'équations (II.17), les différents courants s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds1} = \frac{\varphi_{ds1} - \varphi_{md}}{L_{s1}} \\ i_{qs1} = \frac{\varphi_{qs1} - \varphi_{mq}}{L_{s1}} \\ i_{ds2} = \frac{\varphi_{ds2} - \varphi_{md}}{L_{s2}} \\ i_{qs2} = \frac{\varphi_{qs2} - \varphi_{mq}}{L_{s2}} \\ i_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - \varphi_{md}}{L_r} \\ i_{qr} = \frac{\varphi_{qr} - \varphi_{mq}}{L_r} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \varphi_{md} = L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{mq} = L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En introduisant les expressions des courants (II.29) dans (II.30), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = \left(\frac{\varphi_{ds1}}{L_{s1}} + \frac{\varphi_{ds2}}{L_{s2}} + \frac{\varphi_{dr}}{L_r} \right) L_a \\ \varphi_{mq} = \left(\frac{\varphi_{qs1}}{L_{s1}} + \frac{\varphi_{qs2}}{L_{s2}} + \frac{\varphi_{qr}}{L_r} \right) L_a \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Avec : } L_a = \left(\frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{s1}} + \frac{1}{L_{s2}} + \frac{1}{L_r}} \right)$$

En remplaçant le système d'équation (II.29) dans le système d'équation (II.16) et en le mettant sous forme d'un système d'équations d'état, on aura :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} = v_{ds1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\varphi_{ds1} - \varphi_{md}) + \omega_s \varphi_{qs1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} = v_{qs1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\varphi_{qs1} - \varphi_{mq}) - \omega_s \varphi_{ds1} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} = v_{ds2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\varphi_{ds2} - \varphi_{md}) + \omega_s \varphi_{qs2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} = v_{qs2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\varphi_{qs2} - \varphi_{mq}) - \omega_s \varphi_{ds2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} (\varphi_{dr} - \varphi_{md}) + \omega_{gl} \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -\frac{R_r}{L_r} (\varphi_{qr} - \varphi_{mq}) - \omega_{gl} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

En développant ce système d'équations et en introduisant les expressions de φ_{md} et φ_{mq} , on trouve :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} = v_{ds1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \varphi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \varphi_{ds2} + \omega_s \varphi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_r L_{s1}} \varphi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} = v_{qs1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \varphi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \varphi_{qs2} - \omega_s \varphi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{L_r L_{s1}} \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} = v_{ds2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \varphi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} \varphi_{ds1} + \omega_s \varphi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_r L_{s2}} \varphi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} = v_{qs2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \varphi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_{s1}} \varphi_{qs1} - \omega_s \varphi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{L_r L_{s2}} \varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -\left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \varphi_{dr} + \frac{R_r L_a}{L_r L_{s1}} \varphi_{ds1} + \omega_{gl} \varphi_{qr} + \frac{R_r L_a}{L_r L_{s2}} \varphi_{ds2} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -\left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \varphi_{qr} + \frac{R_r L_a}{L_r L_{s1}} \varphi_{qs1} - \omega_{gl} \varphi_{dr} + \frac{R_r L_a}{L_r L_{s2}} \varphi_{qs2} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

On aura alors :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R_{s1}}{L_{s1}} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} & \omega_s & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_rL_{s1}} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_{s1}}{L_{s1}} + \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_rL_{s1}} \\ \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & -\frac{R_{s2}}{L_{s2}} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} & \omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} & 0 \\ 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & -\omega_s & -\frac{R_{s2}}{L_{s2}} + \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} \\ \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_rL_a}{L_r^2} & \omega_{gl} \\ 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & -\omega_{gl} & -\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_rL_a}{L_r^2} \end{pmatrix}$$

II.4 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande MLI

II.4.1 Modélisation de l'ondeur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [NEY88, AMI08].

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 des onduleurs. Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires. Chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode et qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} +1 & \text{si } K_i \text{ est fermé, } K'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ est ouvert, } K'_i \text{ est fermé} \end{cases}$$

Avec : $f_i + \bar{f}_i = 1$ et $i = 1 \dots 3$.

L'onduleur triphasé peut être représenté par le schéma suivant :

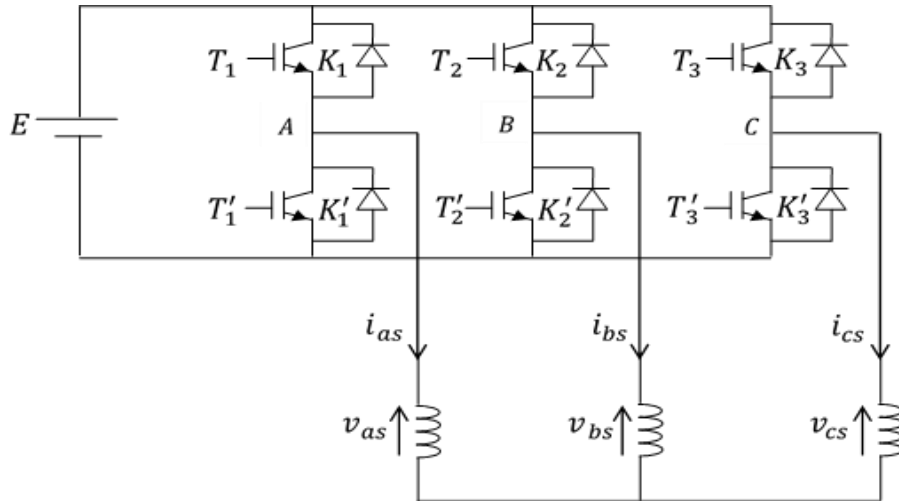


Figure (II.3) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

Ainsi les tensions composées sont données par :

$$v_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \quad (\text{II.34})$$

$$v_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \quad (\text{II.35})$$

$$v_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \quad (\text{II.36})$$

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

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (\text{II.37})$$

La résolution des équations (II.34), (II.35), (II.36) et (II.37) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

II.4.2 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. 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 [CRE97].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

➤ Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{refa1} = V_m \sin(2\pi f_r t) \\ v_{refb1} = V_m \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{refc1} = V_m \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

➤ Pour la deuxième étoile :

$$\begin{cases} v_{refa2} = V_m \sin(2\pi f_r t - \alpha) \\ v_{refb2} = V_m \sin\left(2\pi f_r t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{refc2} = V_m \sin\left(2\pi f_r t - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Avec T_p et V_{pm} représentant respectivement la période et amplitude de la porteuse, l'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$v_p(t) = \begin{cases} V_{pm}(+4t/T_p - 1) & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm}(-4t/T_p + 3) & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- ☞ L'indice de modulation m représentant le rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f_r) ;
- ☞ Le coefficient de réglage en tension r représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm}).

II.4.3 Association de la MASDE-onduleurs de tension à commande MLI

L'alimentation de la machine asynchrone à double étoile se fait par l'association de deux onduleurs de tension alimentés par une ou deux sources de tension continue et commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) déphasée de $\alpha = -\pi/6$, la porteuse triangulaire peut être unique en utilisant un indice de modulation $m=63$, ou deux porteuses déphasées de $-\pi/6$ pour un indice $m=21$.

La représentation schématique de l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension à commande M.L.I sinus-triangle est illustrée par la figure (II.4).

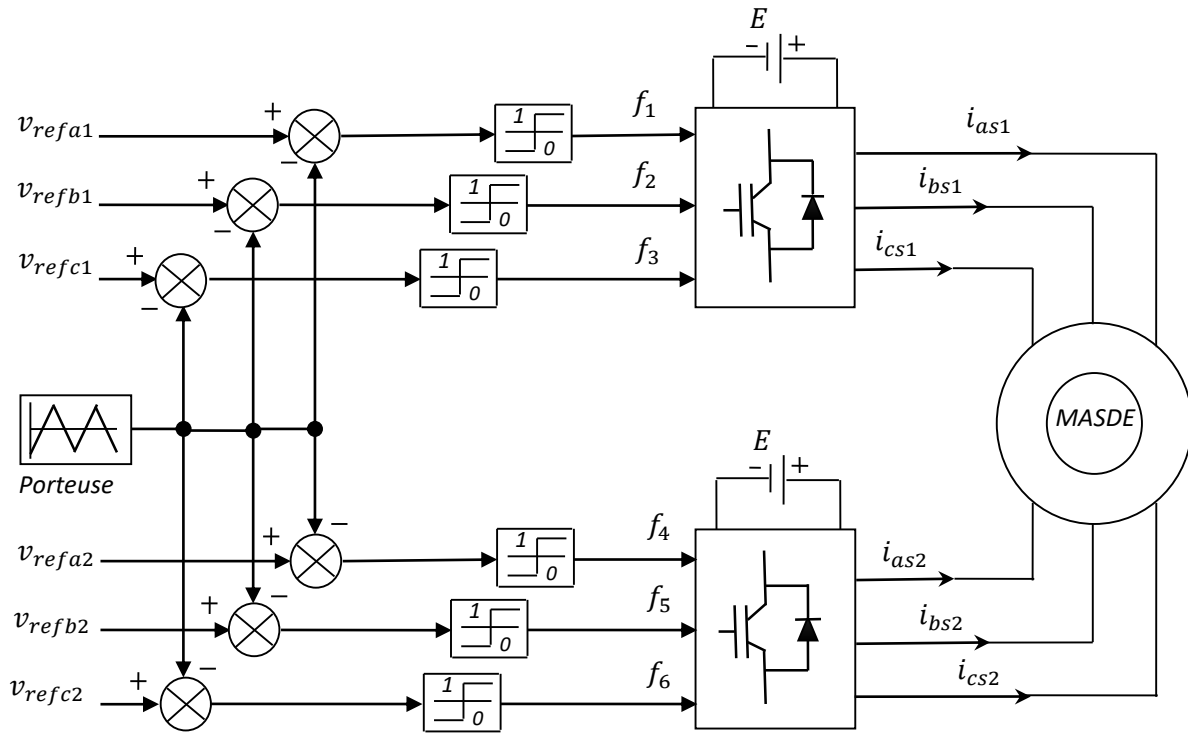


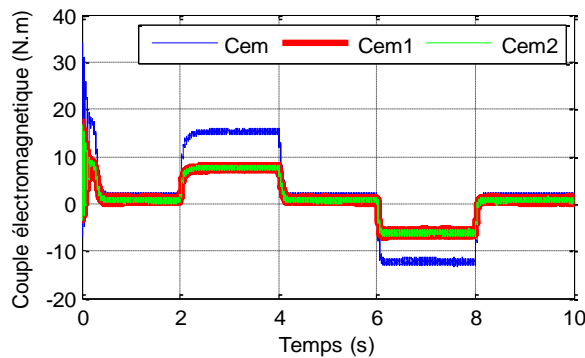
Figure (II.4) : Association MASDE- Convertisseurs de tensions à commande MLI

II.5 Simulation et interprétation des résultats

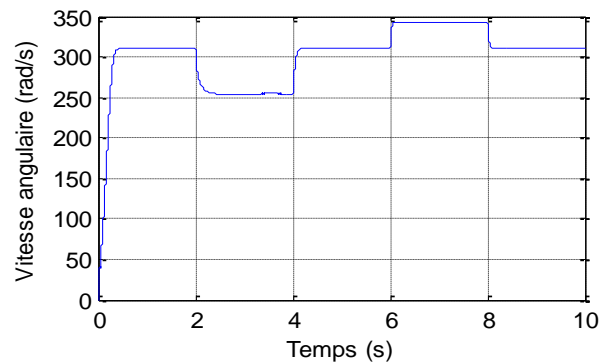
II.5.1 Machine à double étoile à paramètres identiques

Pour la simulation, on a implanté le modèle électrique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink®. La simulation est effectuée avec un décalage angulaire $\alpha = 30^\circ$.

Dans cette première simulation la machine à double étoile possède deux bobines a paramètres identique alimenter par deux onduleur de tension à commande MLI, les résultats de simulation sont montrés par la figure II.5.



-(a)-



-(b)-

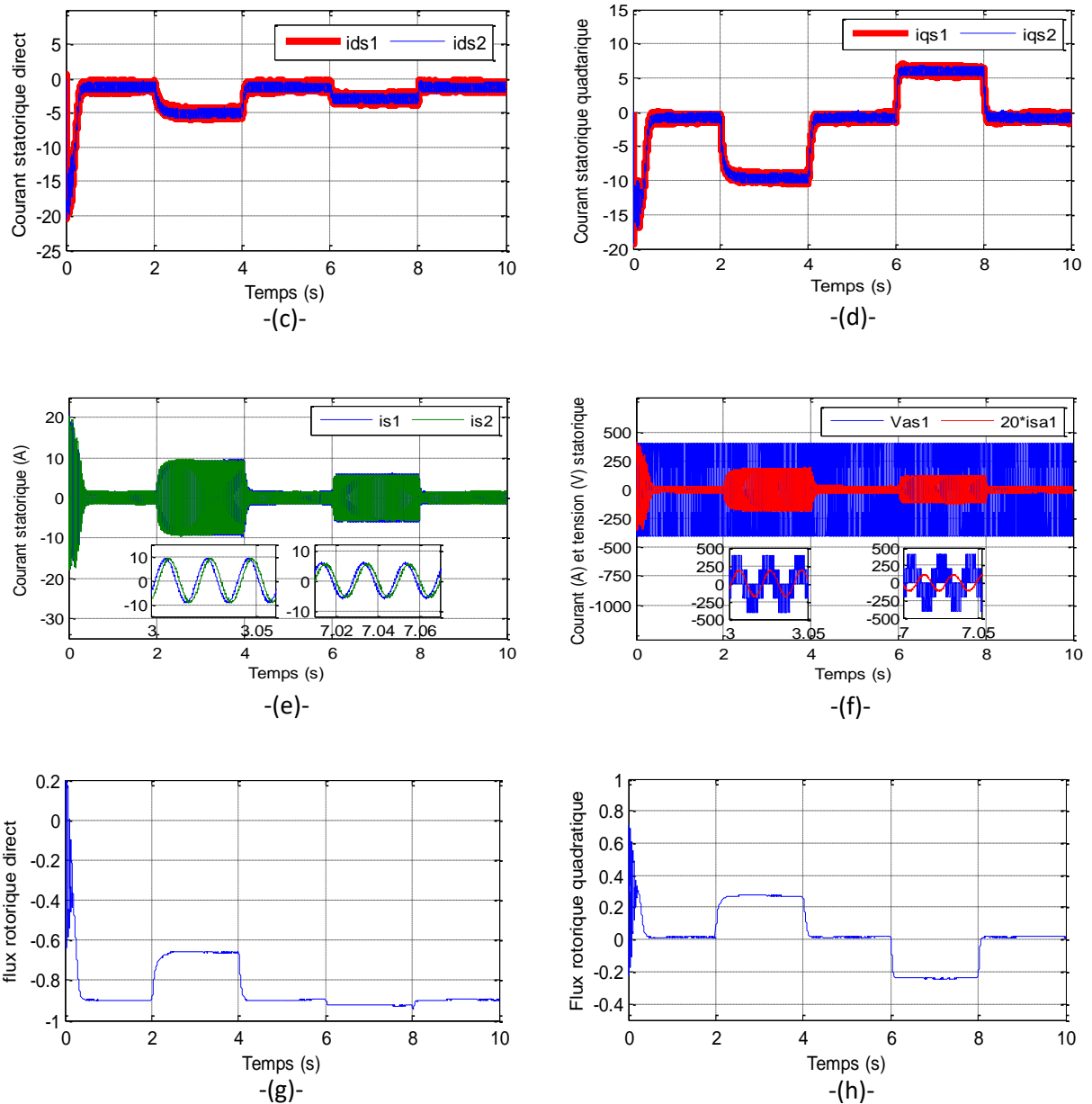


Figure (II.5) : Evolution des caractéristiques de la MASDE à paramètres identiques alimentée par deux convertisseurs, suivie de l'application des charges $C_r = 14 \text{ N.m}$ et $C_r = -14 \text{ N.m}$ respectivement entre les intervalles du temps $[2, 4] \text{ s}$ et $[6, 8] \text{ s}$.

➤ **Interprétations des résultats**

La figure (II.5) représente la réponse de la MASDE alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 63$.

Ce choix, nous permet d'utiliser une seule porteuse au lieu de deux. Une charge nominale de valeur $C_r = 14 \text{ Nm}$ représentant le fonctionnement moteur est appliquée pendant

le laps de temps $t = [2s, 4s]$ et à $t = [6s, 8s]$, une charge nominale de valeur négative de -14 Nm, représentant le fonctionnement générateur, est appliquée à la machine.

Les résultats de simulation montrent que le couple électromagnétique total suit parfaitement la variation du couple résistant et est égale à la somme des deux couples électromagnétiques des deux étoiles, figure (a).

La vitesse diminue pendant l'application du couple positif et augmente en dépassant la vitesse de synchronisme pendant l'application d'un couple négative qui correspond à l'entraînement de la machine au-delà de sa vitesse du synchronisme, figure (b).

Les courants statoriques directe et en quadrature varient en fonction de la variation du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique, figure (c) et (d).

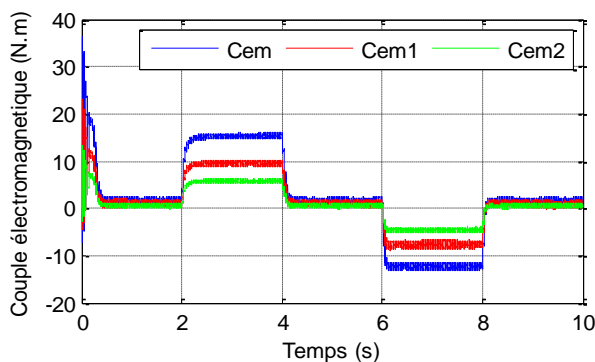
La figure (e) montre bien le déphasage entre les courants statoriques de la première étoile et de la deuxième étoile qui est de $\alpha=30^\circ$.

Pendant l'application d'un couple positif, les courants statoriques et les tensions sont en phase, ce qui correspond à une consommation de la puissance active et réactive de la machine, par contre le couple résistant négatif entraîne un déphasage de presque 180° , ce qui correspond à une production de la puissance active au réseau et une légère consommation de la puissance réactive nécessaire pour sa magnétisation, figure (f).

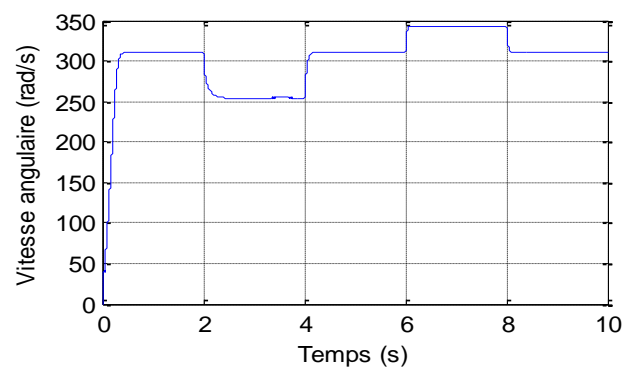
Les flux rotorique direct et en quadrature connaissent des variations qui correspondent aux variations du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique, figure (g) et (h).

II.5.2 Machine à double étoile à paramètres non identiques

Dans cette simulation, la machine est composée de deux étoiles à paramètres non identiques, tel que la première étoile possède 75% de la puissance et la deuxième étoile 25%, les résultats de simulations sont montrés dans la figure (II.6).



-(a)-



-(b)-

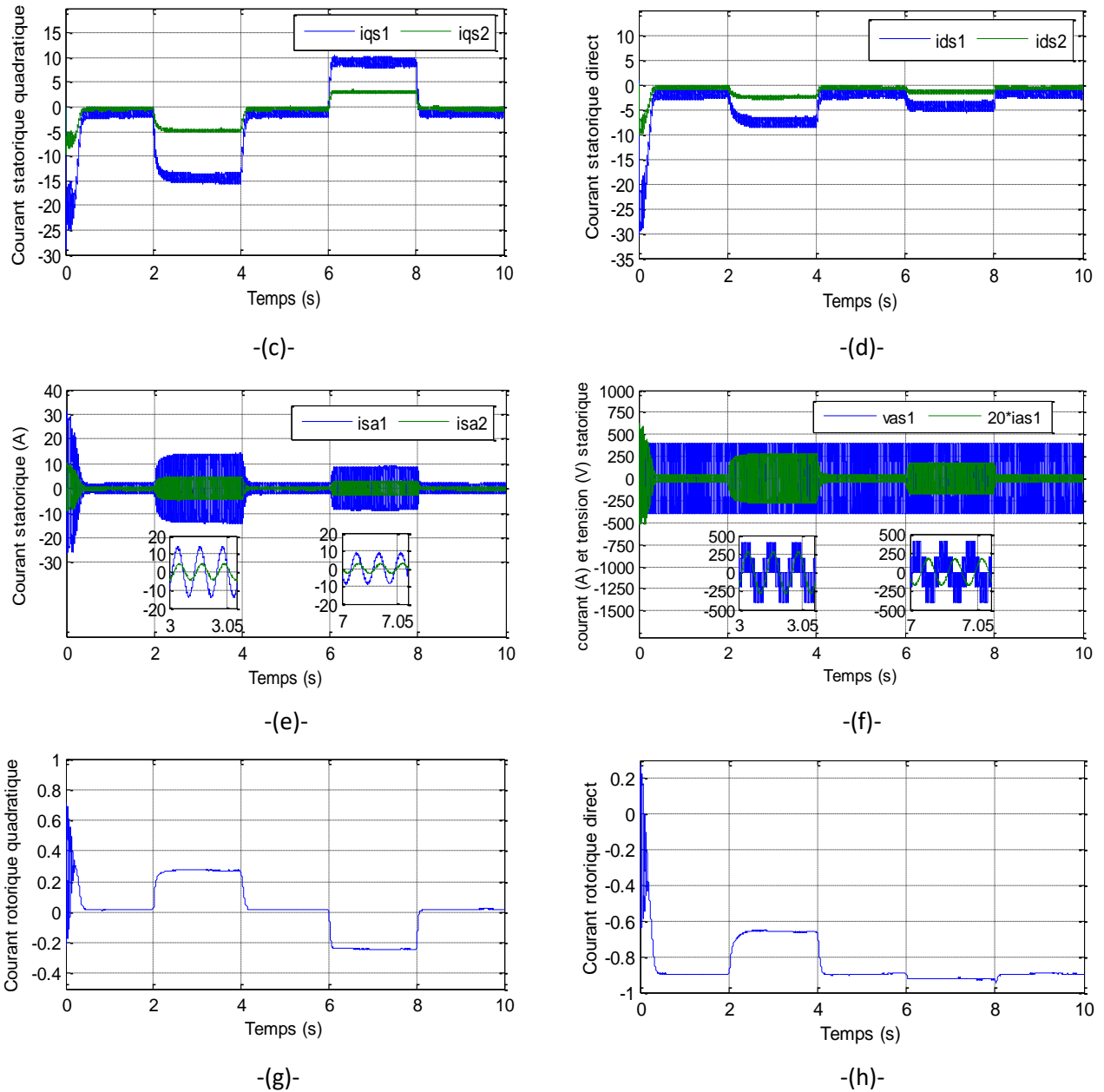


Figure (II.6) : Evolution des caractéristiques de la MASDE à paramètres non identiques alimentée par deux convertisseurs, suivie de l'application des charges $C_r = 14 \text{ N.m}$ et $C_r = -14 \text{ N.m}$ respectivement entre les intervalles du temps $[2, 4] \text{ s}$ et $[6, 8] \text{ s}$.

➤ **Interprétations des résultats**

Les résultats de simulation de la figure (II.6) montrent que le couple électromagnétique total suit la variation du couple résistant tel que l'étoile 1 prend une valeur de $C_{em1} = 10,5 \text{ Nm}$ et l'étoile 2 une valeur de $C_{em2} = 4,5 \text{ Nm}$ ce qui correspond à 75% et 25% du couple total respectivement, figure (a). La vitesse du rotor varie en fonction de la variation du couple résistant, figure (b). Les figures (c) et (d) montrent les valeurs des courants statoriques directe et en quadratures de l'étoile 1 et 2, ce qui illustre bien la différence des

valeurs de courants entre les deux étoiles. La figure (e) montre bien le déphasage entre les courants statoriques de l'étoile 1 et 2.

La machine consomme des puissance active et réactive pendant l'application d'un couple positif, et produit de la puissance active en consommant une portion de la puissance réactive pendant l'application d'un couple négatif, figure (f). Le flux direct et en quadrature varie en fonction de la variation du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique, figures (g) et (h).

II.6 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'établissement d'un modèle mathématique de la MASDE basé sur la théorie unifiée des machines électriques tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices, en passant du modèle triphasée au modèle biphasée basée sur la transformation de Park.

L'étude de la MASDE alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI a montré bien la poursuite de la variation du couple électromagnétique total, qui correspond à la somme des couples électromagnétiques des deux étoiles dans le cas où les paramètres sont identiques ou non, en fonction du couple résistant. La diminution de la vitesse rotorique pendant l'application d'un couple résistant positive et une augmentation pour un couple négatif correspondant à un entrainement du rotor au-delà de sa vitesse du synchronisme, les flux rotorique direct et en quadrature suivent la variation du couple électromagnétique et la vitesse rotorique ce qui correspond à un couplage entre le couple et le flux.

L'insertion de la charge positive puis négative engendre des variations au niveau de la vitesse rotorique, afin de remédier à ce problème, et pour une meilleure maîtrise de la vitesse, nous proposons dans le prochain chapitre la technique de régulation par la commande vectorielle basée sur le découplage entre les grandeurs du flux rotorique et du couple électromagnétique.

Chapitre III

Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile

III.1 Introduction

Le développement de nouvelles stratégies de commandes par des semi-conducteurs et de convertisseurs statiques a permis une augmentation des fréquences de commutation et par conséquent une meilleure maîtrise de la conversion d'énergie. Parallèlement, les moyens de calculs ont considérablement évolué. Tous ces progrès ont permis l'application de nouveaux algorithmes de commande assurant un découplage de flux et de couple dans les machines à courants alternatifs.

L'algorithme de commande le plus populaire est la commande vectorielle à flux rotorique orienté (Flux Oriented Control), introduite par Kovac en 1959 et reprise par Blaschke en 1972. En effet, elle nécessite des calculs de transformation de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations etc., ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique [BAG99, AMI08].

Aujourd'hui grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, de nombreux entraînements à courant continu sont remplacés par des variateurs à courant alternatif en particulier les machines asynchrones [YAY91].

Dans le présent chapitre, nous appliquerons la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sur la MASDE. Cependant, nous présenterons au premier lieu le principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle, et enfin nous commenterons les performances apportées par ce type de réglage après l'obtention et illustration des résultats de simulations.

III.2 Principe de la commande vectorielle

La technique de la commande vectorielle repose sur le fait d'introduire une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage du couple similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée [TAM05] comme montré dans la figure (III.1). Cette dernière présente une qualité intrinsèque, car elle permet un contrôle séparé du flux et du couple.

Le couple électromagnétique d'une machine à courant continu est exprimé par :

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

Avec φ_f : Flux imposé par le courant d'excitation I_f , et I_a : Courant d'induit, K , K' Constantes.

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

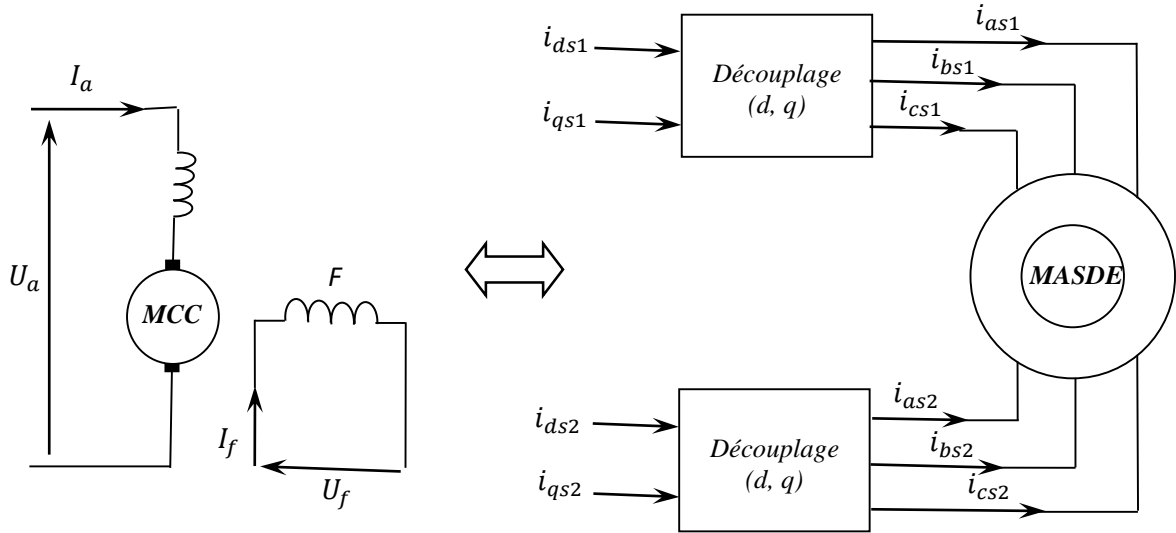


Figure (III.1) : Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

Sachant que l'expression des couples électromagnétiques des deux étoiles de la machine asynchrone à double étoile est fonction des courants statoriques et des flux rotoriques, cependant, en choisissant l'orientation du flux rotorique suivant l'axe direct d ($\varphi_{dr} = \varphi_r$, $\varphi_{qr} = 0$), on aura la forme des couples électromagnétiques suivante :

$$\begin{cases} C_{em1} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r i_{qs1} = K'' \varphi_r i_{qs1} \\ C_{em2} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r i_{qs2} = K'' \varphi_r i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec : $K'' = p \frac{L_m}{L_m + L_r}$.

D'après l'équation (III.2), nous constatons que les couples électromagnétiques résultent de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Ces expressions rappellent le couple de la machine à courant continu à excitation séparée.

On déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone à double étoile avec sa commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

III.3 Choix d'orientation du flux

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

Pour cela, trois choix sont possibles :

- Orientation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

- Orientation du flux statorique :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- Orientation du flux d'entrefer :

$$\begin{cases} \varphi_{dg} = \varphi_g \\ \varphi_{qg} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Pour la MASDE, nous optons pour le choix de l'orientation du flux rotorique (III.3), car cela permet d'aboutir à un variateur de vitesse où le flux et les couples électromagnétiques sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques.

III.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle

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

III.4.1 Méthode de commande vectorielle directe

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

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

III.4.2 Méthode de commande vectorielle indirecte

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

III.5 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et par orientation du flux rotorique où la position du flux est déduite de la relation donnant la vitesse du glissement.

On considère comme grandeurs de référence le flux rotorique φ_r^* et les couples électromagnétiques C_{em1}^* et C_{em2}^* . La figure (III.2) représente le schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté.



Figure (III.2) : Schéma bloc simplifié de la commande à flux orienté (FOC)

En considérant que :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^* \quad (\text{III.6})$$

$$\varphi_{qr} = 0 \quad (\text{III.7})$$

Et en remplaçant (III.6), (III.7) dans les équations de tensions rotorique (II.16), on obtient :

$$R_r i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \quad (\text{III.8})$$

$$R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \varphi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \varphi_r^*}{R_r} \quad (\text{III.9})$$

Et à partir des équations (II.24) et (II.25), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_r^* - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{III.10})$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (\text{III.11})$$

En introduisant (III.10) et (III.11) dans le système d'équations des flux statorique (II.17), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 i_{ds1} + L_r \mu i_{ds2} + \mu \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 i_{qs1} + L_r \mu i_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 i_{ds2} + L_r \mu i_{ds1} + \mu \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 i_{qs2} + L_r \mu i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec : $\mu = \frac{L_m}{L_m + L_r}$ et $\lambda_{1,2} = L_{s1,2} + \mu L_r$

En substituant (III.8) dans (III.10), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III.13})$$

À partir de l'équation (III.11), on trouve

$$L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) = -(L_m + L_r) i_{qr} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant (III.12) à (III.14) dans le système d'équations des tensions statoriques (II.16) et en introduisant l'expression (III.9), on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds1}^* = R_{s1} i_{ds1} + L_{s1} P i_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} i_{qs1} + \tau_r \varphi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1}^* = R_{s1} i_{qs1} + L_{s1} P i_{qs1} + \omega_s^* (L_{s1} i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ v_{ds2}^* = R_{s2} i_{ds2} + L_{s2} P i_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} i_{qs2} + \tau_r \varphi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2}^* = R_{s2} i_{qs2} + L_{s2} P i_{qs2} + \omega_s^* (L_{s2} i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

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

En introduisant l'équation (III.9) dans (III.11), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r)} \frac{(i_{qs1} + i_{qs2})}{\varphi_r^*} \quad (\text{III.16})$$

À partir de la relation (III.2), on trouve :

$$\begin{cases} i_{qs1} = \frac{(L_m + L_r) C_{em1}^*}{p L_m} \frac{\varphi_r^*}{\varphi_r^*} \\ i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r) C_{em2}^*}{p L_m} \frac{\varphi_r^*}{\varphi_r^*} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Le système d'équations électriques (III.15) montre que les tensions (v_{ds1}^* , v_{qs1}^* , v_{ds2}^* et v_{qs2}^*) influent au même temps sur les composantes des courants statoriques directs et en quadratures (i_{ds1} , i_{qs1} , i_{ds2} et i_{qs2}), donc sur le flux et sur les couples électromagnétiques. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage, cela en définissant de

nouvelles variables v_{ds1r} , v_{qs1r} , v_{ds2r} et v_{qs2r} n'agissent respectivement que sur i_{ds1} , i_{qs1} , i_{ds2} et i_{qs2} tels que :

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

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

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

Tel que :

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

III.5.1 Identification des paramètres des régulateurs PI

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, telle que :

$$H(P) = \frac{1}{aP + b} \quad (\text{III.21})$$

se fait d'une manière générale comme suit :

La fonction de transfert du régulateur PI est :

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

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

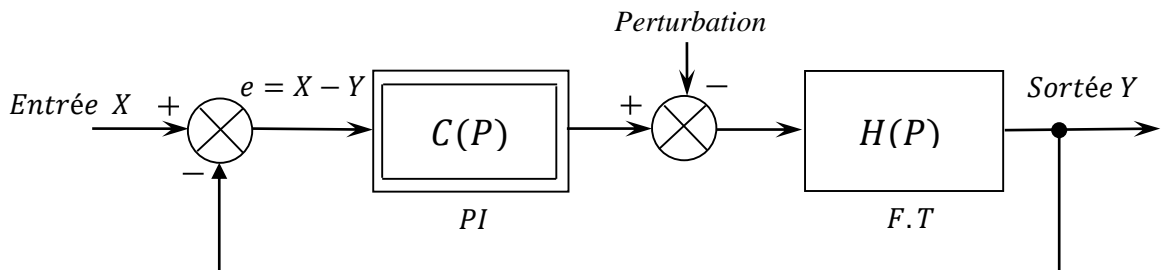


Figure (III.3) : Schéma d'un système asservi de premier ordre régulé par un régulateur PI

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

$$T(P) = C(P)H(P) = \frac{K_p P + K_i}{aP^2 + bP} \quad (\text{III.23})$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(P) = \frac{T(P)}{1 + T(P)} = \frac{K_p P + K_i}{aP^2 + (b + K_p)P + K_i} \quad (\text{III.24})$$

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

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

Il suffit d'identifier (III.23) à (III.24) comme suit :

$$\frac{K_p P + K_i}{aP^2 + (b + K_p)P + K_i} = \frac{1}{TP + 1} \quad (\text{III.26})$$

Ce qui donne :

$$K_p TP^2 + (K_i T + K_p)P + K_i = aP^2 + (b + K_p)P + K_i \quad (\text{III.27})$$

$$\text{D'où :} \quad \begin{cases} K_p = \frac{a}{T} \\ K_i = \frac{b}{T} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

La figure (III.4) représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques (Première et deuxième étoile).

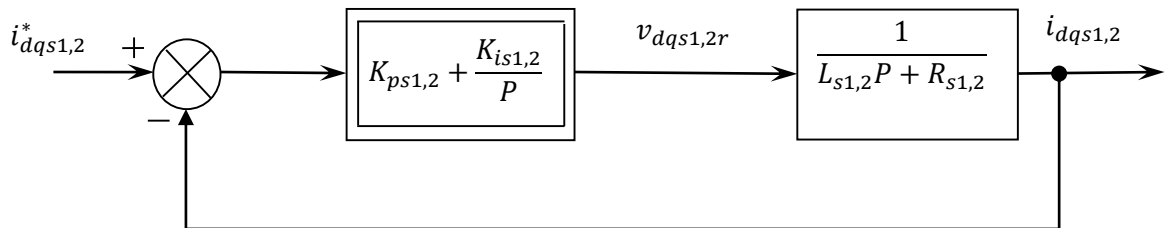


Figure (III.4) : Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} K_{ps1} = \frac{L_{s1}}{T} \\ K_{is1} = \frac{R_{s1}}{T} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} K_{ps2} = \frac{L_{s2}}{T} \\ K_{is2} = \frac{R_{s2}}{T} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

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 du système.

III.5.2 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

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

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

Et schématisé par la figure (III.5).

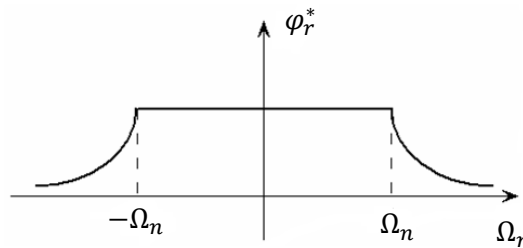


Figure (III.5) : Schéma de défluxage

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

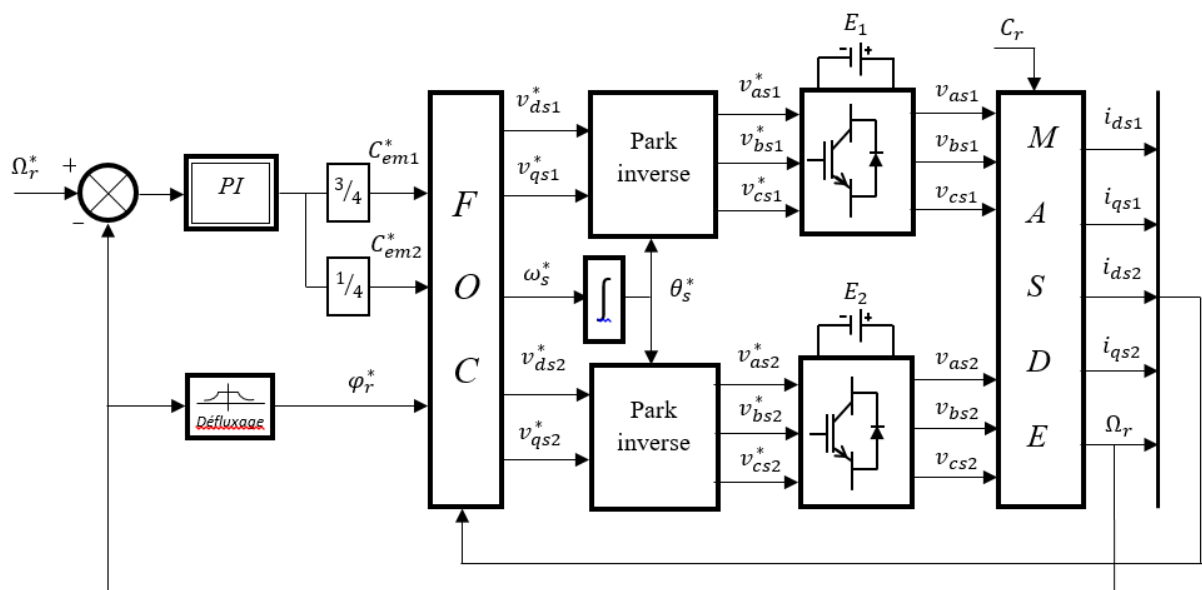


Figure (III.6) : Schéma de la commande FOC avec régulation de vitesse

Le schéma de réglage de la vitesse de la MASDE est donné par la figure (III.6) et le schéma du bloc de découplage FOC est représenté par la figure (III.7).

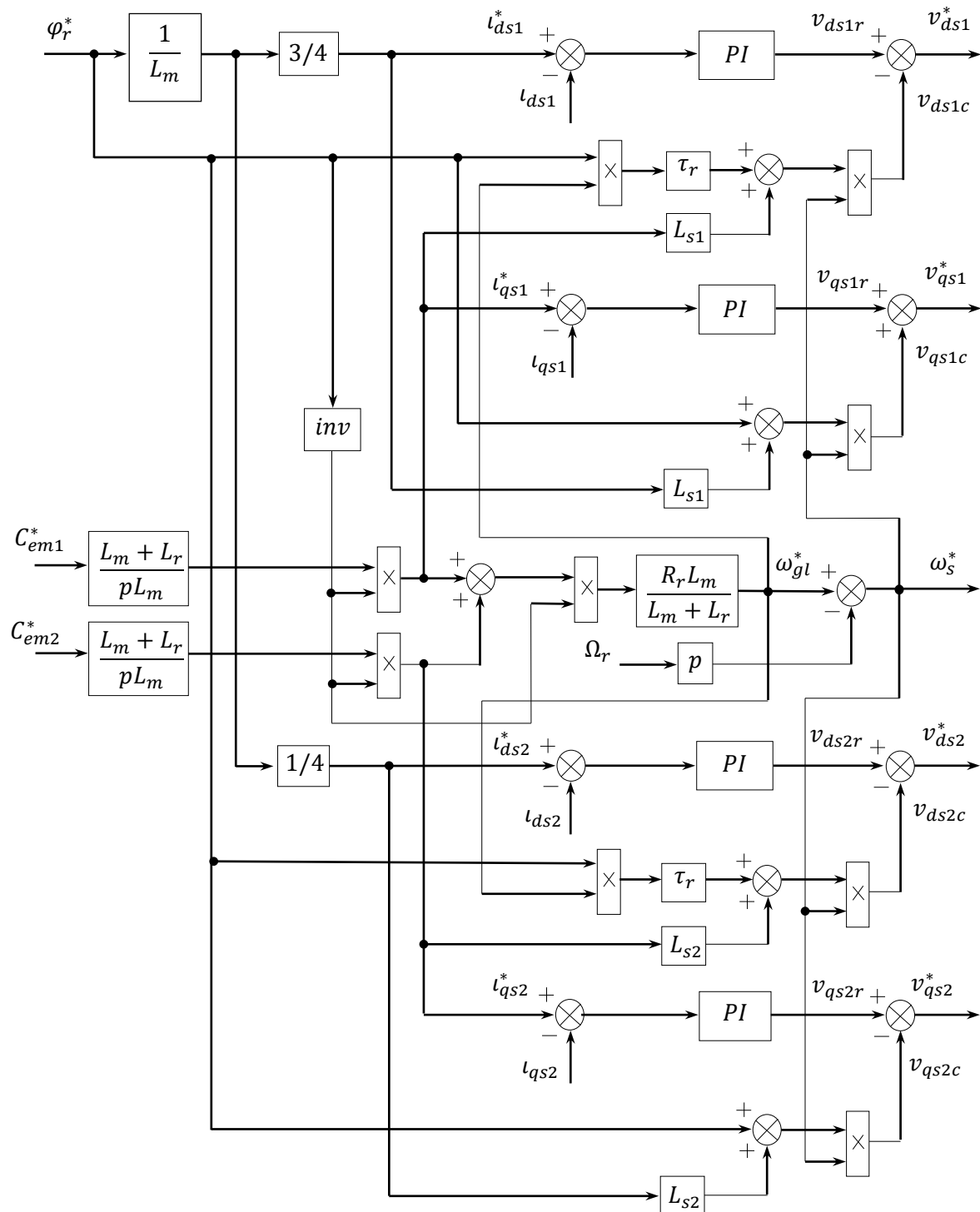


Figure (III.7) : Représentation schématique du bloc de découplage FOC

III.5.3 Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de la vitesse est donné par la figure (III.8) :

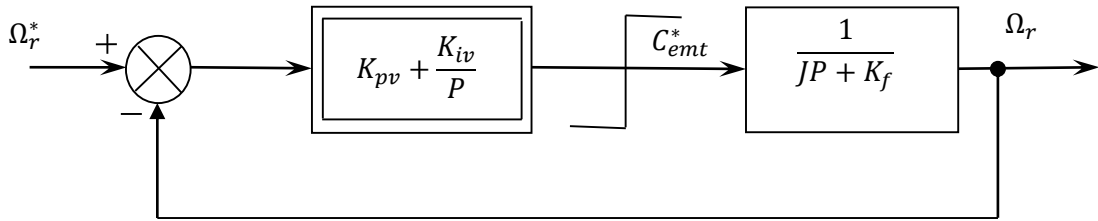


Figure (III.8) : Schéma de la boucle de régulation de la vitesse rotorique

Dans cette boucle de régulation le couple électromagnétique total C_{emt}^* serait égale à la somme du couple de la première étoile C_{em1}^* et de la deuxième étoile C_{em2}^* .

L'identification nous donne :

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

On prend : $T = \tau_r$

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

$$C_{em1,2}^*(lim) = \begin{cases} C_{em1,2}^* & si \quad |C_{em1,2}^*| \leq C_{emMax1,2} \\ C_{emMax1,2} \text{ sign}(C_{em}^*) & si \quad |C_{em1,2}^*| \geq C_{emMax1,2} \end{cases} \quad (III.32)$$

III.5.4 Simulation et interprétation des résultats

La figure (III.9) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la régulation de vitesse par la méthode indirecte et par application des charges $C_r = 14 \text{ Nm}$ et $C_r = -14 \text{ Nm}$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [2, 4]s, [6, 8]s$ en imposant la vitesse de référence $\Omega_r^* = 300 \text{ rad/s}$.

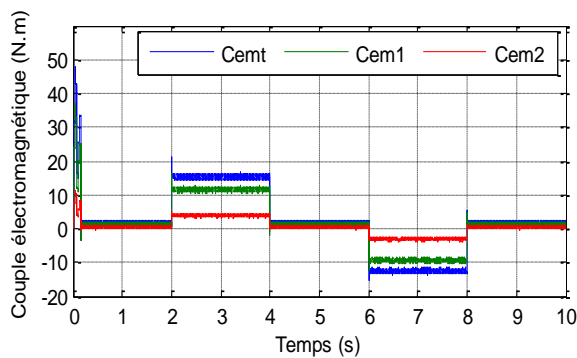
Les résultats de simulation montrent que le couple électromagnétique total est la somme des deux couple électromagnétique de l'étoile 1 et de l'étoile 2 tel que le premier prend la valeur de $C_{em1} = 10,5 \text{ N.m}$ et le deuxième $C_{em2} = 4,5 \text{ N.m}$ correspondant à 75% et 25% du couple total qui varie en fonction du couple résistant, figure (a).

La vitesse rotorique prend la valeur de référence et reste inchangée, figure (b) ; les courants statoriques en quadrature suivent la variation du couple électromagnétique et les courants directs restent constants correspondant au découplage entre le couple électromagnétique et le flux rotorique montré par les figure (c) et (d) respectivement ; le déphasage électrique entre les courants statorique de la première et de la deuxième étoile est bien illustré par la figure (e).

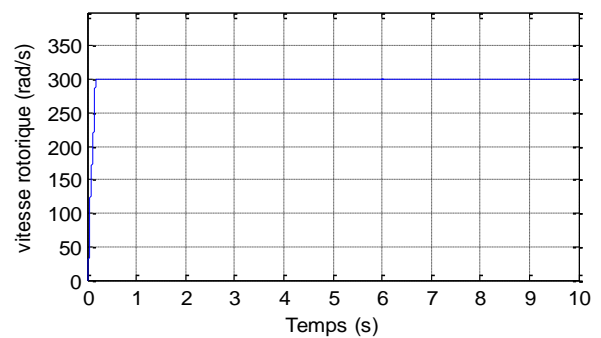
La machine consomme de la puissance active et réactive pendant l'application d'un couple résistant positif et produit de la puissance active en absorbant une portion de la puissance réactive pendant l'application d'un couple résistant négatif, figure (f).

Les flux rotorique direct et en quadrature suivent leurs valeurs de référence qui sont de $\varphi_{dr} = 1$ et $\varphi_{qr} = 0$ Weber montrés par les figure (g) et (h), respectivement.

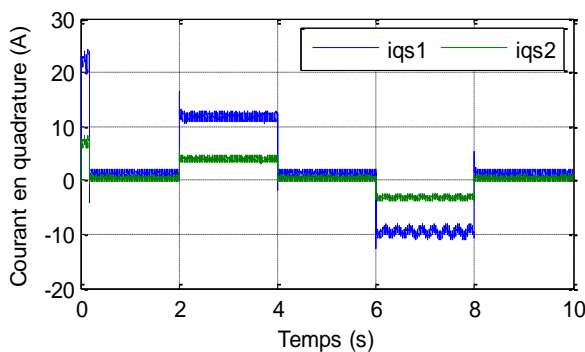
Néanmoins, au démarrage et pendant l'application du couple résistant, les flux direct et en quadrature présentent des oscillations plus au moins importantes ceux qui fragilisent le fonctionnement de la machine pendant le fonctionnement normal et dégradé et nécessite une régulation de flux.



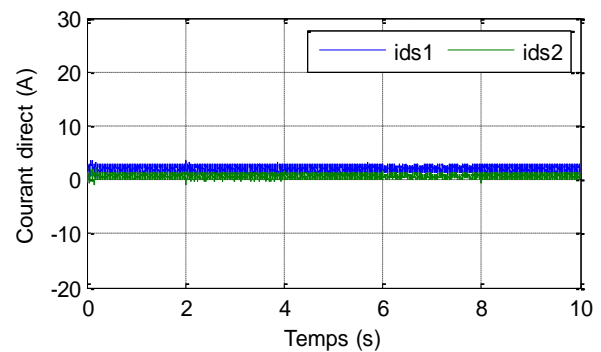
-(a)-



-(b)-



-(c)-



-(d)-

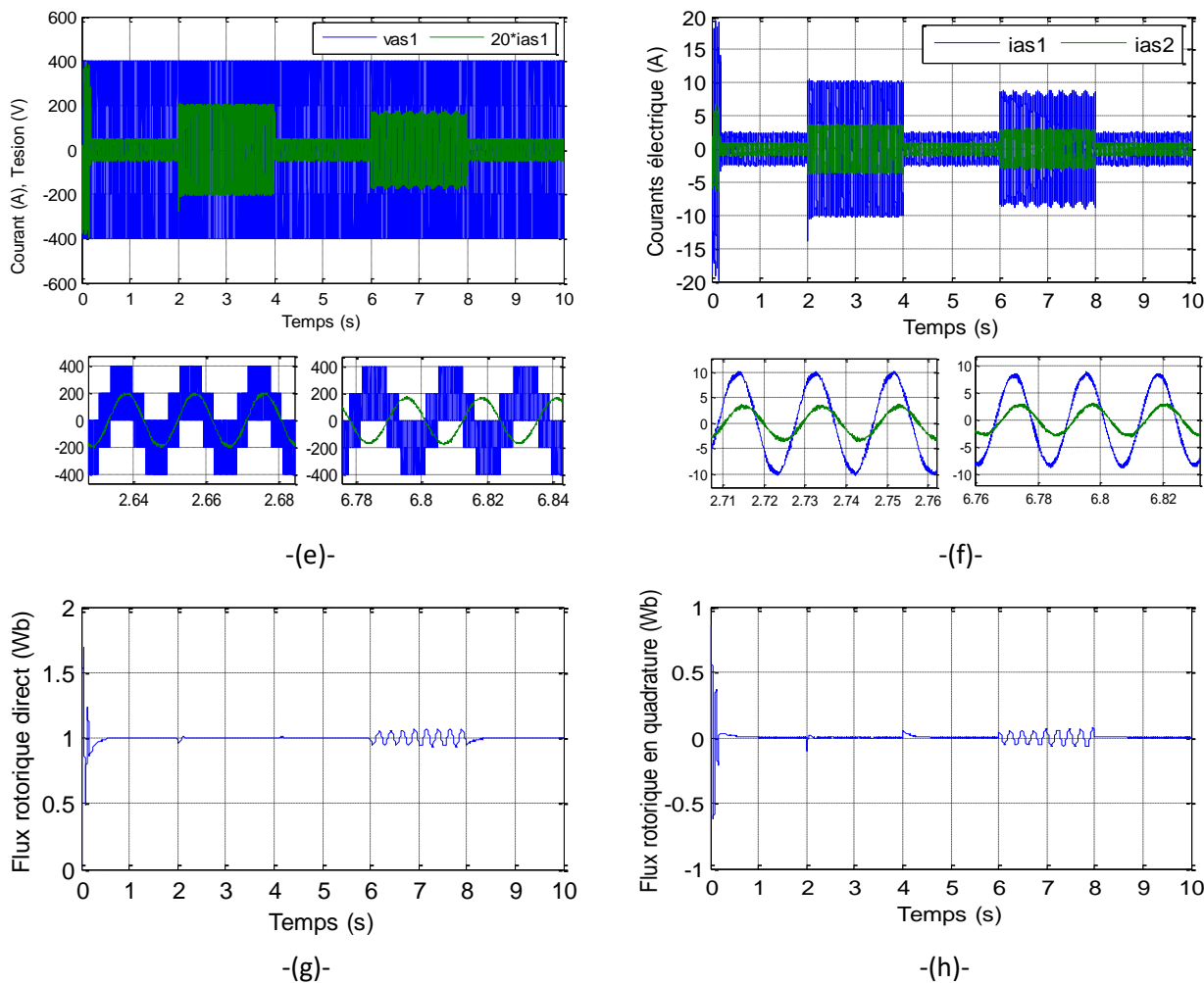


Figure (III.9) : Régulation de la vitesse par la méthode indirecte, avec application des charges $C_r=14Nm$ et $-14Nm$ entre les intervalles de temps $[2, 4]$ s et $[6, 8]$ s.

III.6 Commande vectorielle directe avec régulation de vitesse

La figure (III.10) schématise le principe de la commande à flux orienté modifié (MFOC).

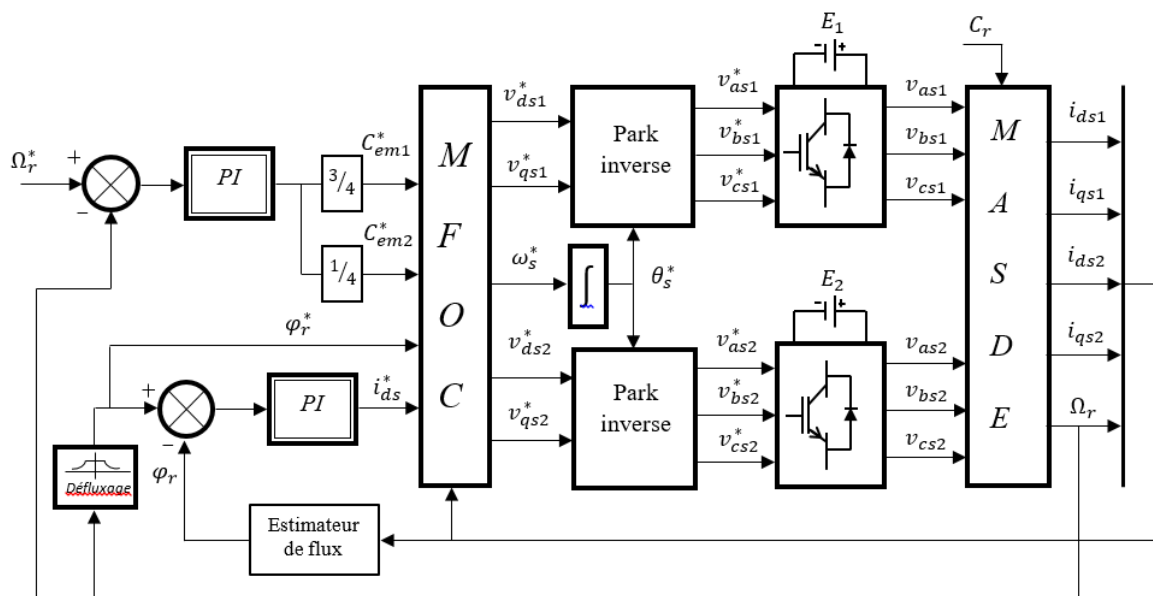


Figure (III.10) : Représentation schématique de la commande MFOC sur la MASDE

Le flux est régulé par contre-réaction et est estimé à partir des courants statoriques et de la pulsation des courants rotoriques de la machine. Dans cette application, le bloc de découplage (FOC) est modifié.

III.6.1 Estimateur du flux rotorique

À partir du système d'équations des tensions rotoriques (II.16), on tire :

$$\frac{d}{dt} \varphi_{dr} = -R_r i_{dr} + \omega_{gl} \varphi_{qr} \quad (\text{III.33})$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{qr} = -R_r i_{qr} - \omega_{gl} \varphi_{dr} \quad (\text{III.34})$$

Et des équations des flux rotoriques (II.17), on obtient :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r + L_m} [\varphi_{drest} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{III.35})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r + L_m} [\varphi_{qrest} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{III.36})$$

En remplaçant (III.35) dans (III.33) et (III.36) dans (III.34), on trouve :

$$\frac{d}{dt} \varphi_{drest} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2}) - \frac{R_r}{L_r + L_m} \varphi_{drest} + \omega_{gl} \varphi_{qrest} \quad (\text{III.37})$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{qrest} = \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \frac{R_r}{L_r + L_m} \varphi_{qrest} - \omega_{gl} \varphi_{drest} \quad (\text{III.38})$$

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

$$\varphi_{rest} = \sqrt{\varphi_{drest}^2 + \varphi_{qrest}^2} \quad (\text{III.39})$$

III.6.2 Identification des paramètres du régulateur de flux

La boucle de régulation de flux rotorique est illustrée par la figure suivante :

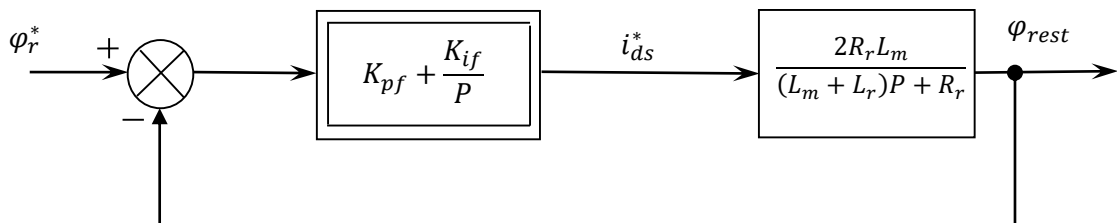


Figure (III.11) : Boucle de régulation du flux rotorique

Le courant statorique direct i_{ds}^* est égale à la somme du courant statorique direct de l'étoile 1 et du courant statorique direct de l'étoile 2.

L'identification donne :

$$\begin{cases} K_{pf} = \frac{L_r + L_m}{2R_r L_m T} \\ K_{if} = \frac{1}{2L_m T} \end{cases} \quad (III.40)$$

On prend : $T = \tau_r$

La boucle interne de la commande vectorielle directe MFOC est représentée par la figure (III.12).

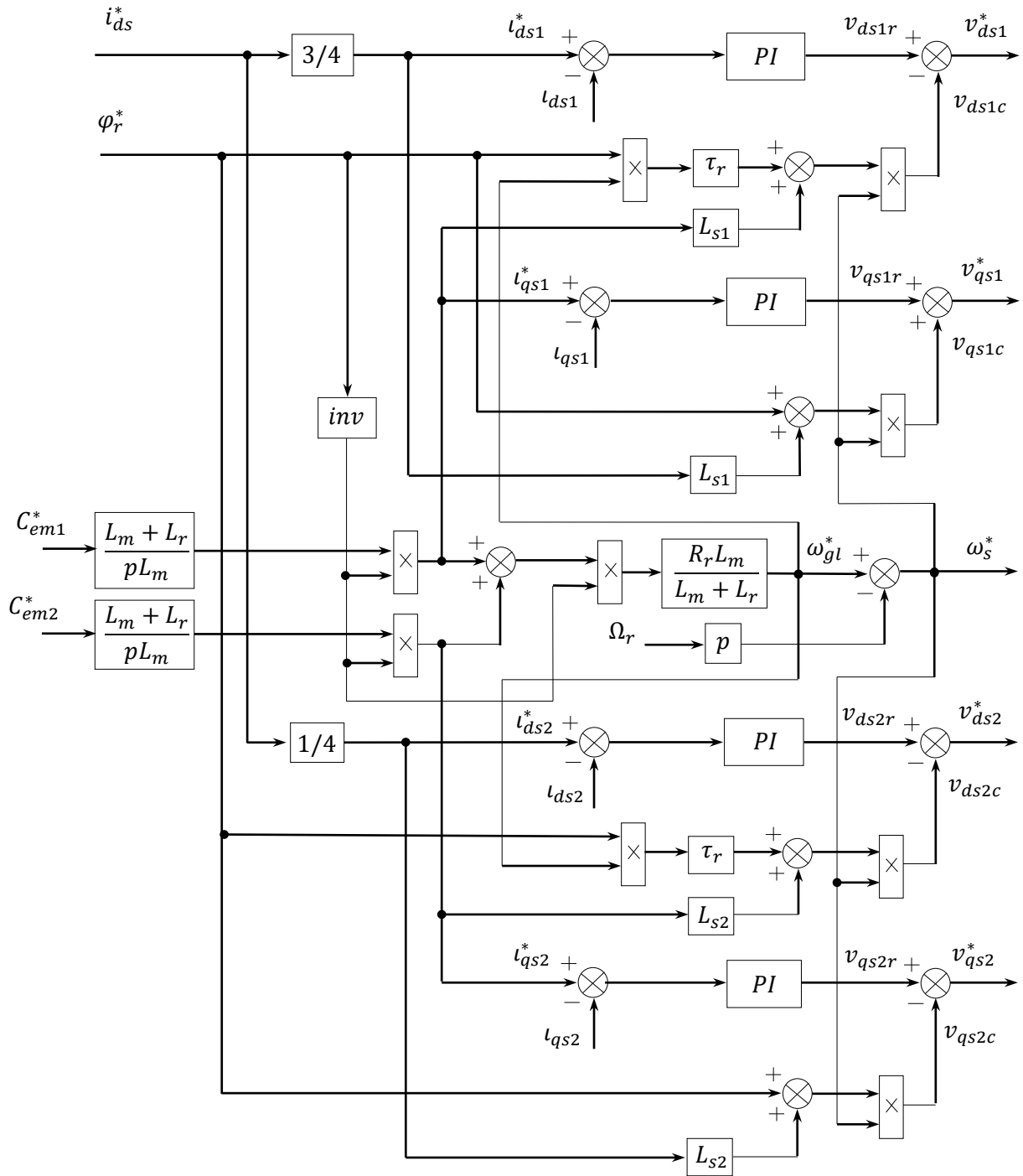


Figure (III.12) : Représentation schématique du bloc de découplage MFOC

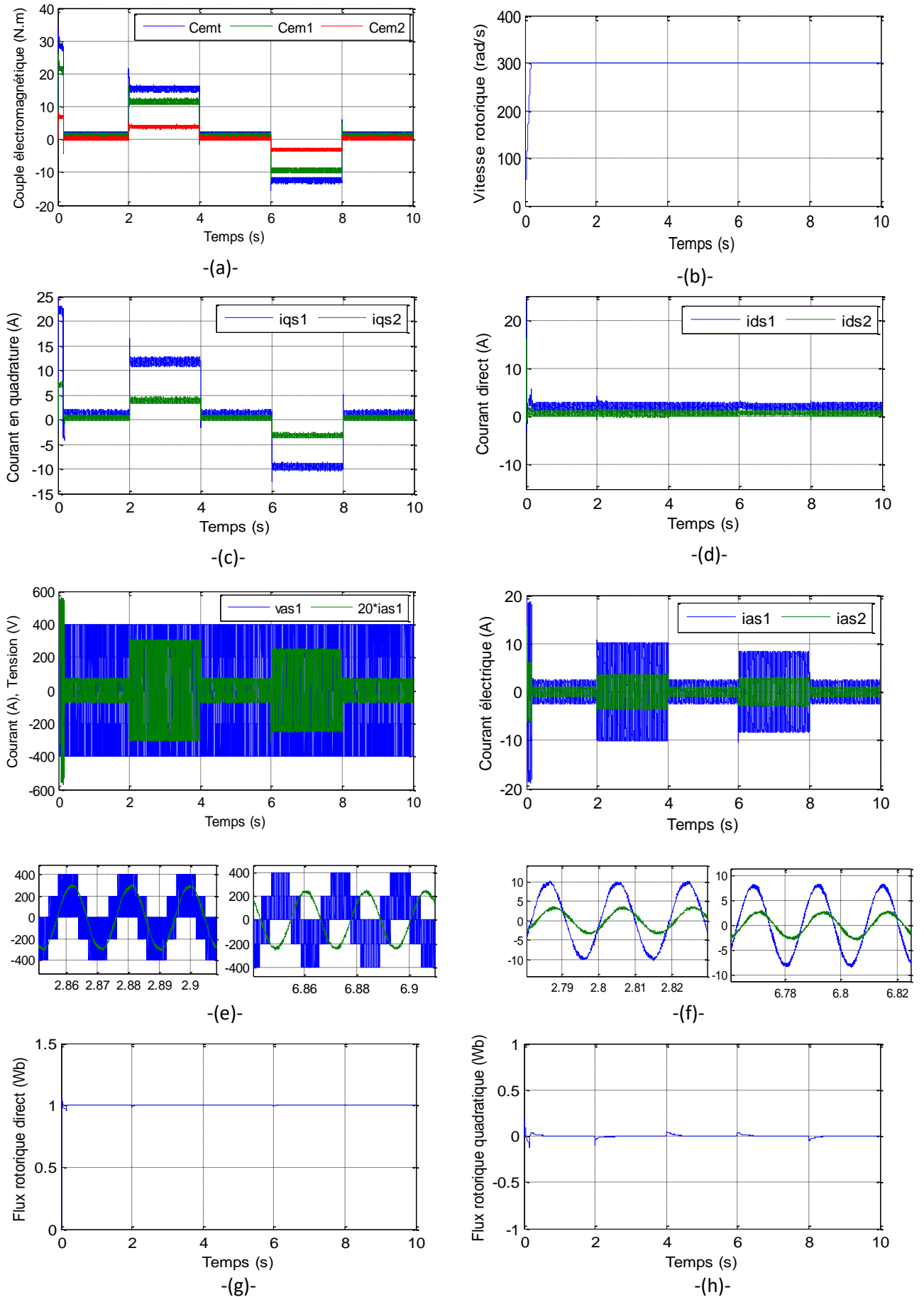


Figure (III.13) : Régulation de la vitesse par la méthode directe

III.6.3 Simulation et interprétation des résultats

La figure (III.13) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE, avec la régulation de la vitesse par la méthode directe, suivi de l'application des charges $C_r=14 N.m$ et $-14 N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [2, 4]$ s et $[6, 8]$ s, en imposant une vitesse de référence $\Omega_r^* = 300 \text{ rad/s}$.

Les résultats de simulation montrent que l'évolution du couple électromagnétique reste la même que dans la commande indirecte mais avec moins de dépassement et d'oscillations au régime transitoire et pendant l'application des charges résistifs, figure (a) ;

La vitesse rotorique reste à sa valeur de référence qui est de $\Omega_r = 300 \text{ rad/s}$, figure (b) ; les courants statoriques en quadrature et directs suivent les variations du couple électromagnétique et du flux rotorique, figure (c) et (d) respectivement; la figure (e) montre le déphasage entre l'étoile 1 et 2.

Le déphasage entre les courants et les tensions statoriques de la figure (f) montre l'absorption de la puissance active et réactive pendant le couple positif et la production de la puissance active avec consommation de la puissance réactive pendant l'application du couple négatif. Les flux direct et en quadrature suivent parfaitement les références imposées sans dépassement ou oscillations ce qui est dû à l'introduction de la boucle de régulation de flux, figure (g) et (h) respectivement.

III.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la MASDE, l'objectif étant la régulation de la vitesse. Nous avons développé deux méthodes, l'une pour la régulation de la vitesse par la commande indirecte et l'autre par la commande directe. Cependant, l'étude de ces deux dernières nous permet au mieux de mettre en évidence les caractéristiques de la commande vectorielle sur la MASDE.

La régulation de la vitesse par la commande vectorielle directe présente de meilleures performances par rapport à celles présentées par la méthode indirecte en termes de précision et de stabilité, et cela en introduisant un capteur de flux (une spire sous chaque étoile) ou un estimateur par la mesure des courants statoriques et de la pulsation rotorique.

En fonctionnement génératrice, et à vitesse variable, la tension du bus continu varie en fonction de la variation de la vitesse du vent, dans ce cas, la commande vectorielle serait introduite afin de maintenir la tension à une valeur constante ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Intégration de la machine asynchrone à double étoile à paramètres non identiques dans un système éolien

IV.1 Introduction

Durant les dernières années, les aérogénérateurs à vitesse variable sont de plus en plus utilisés par rapport à ceux à vitesse fixe, grâce à leur fonctionnement sur une large plage de vitesses, permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées [GHE11, CHE18]. Pour cela, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type asynchrone à double étoile, utilisée dans des sites de production autonomes.

Ce chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la commande du système éolien à vitesse variable après la présentation du modèle proposé basé sur une GASDE à paramètres non identiques et avec un fonctionnement indépendant.

IV.2 Description du système étudié

Le rotor de la GASDE est de type à cage. Il est simple, robuste, sans contact glissant, ce qui peut garantir une bonne sécurité et fiabilité du système.

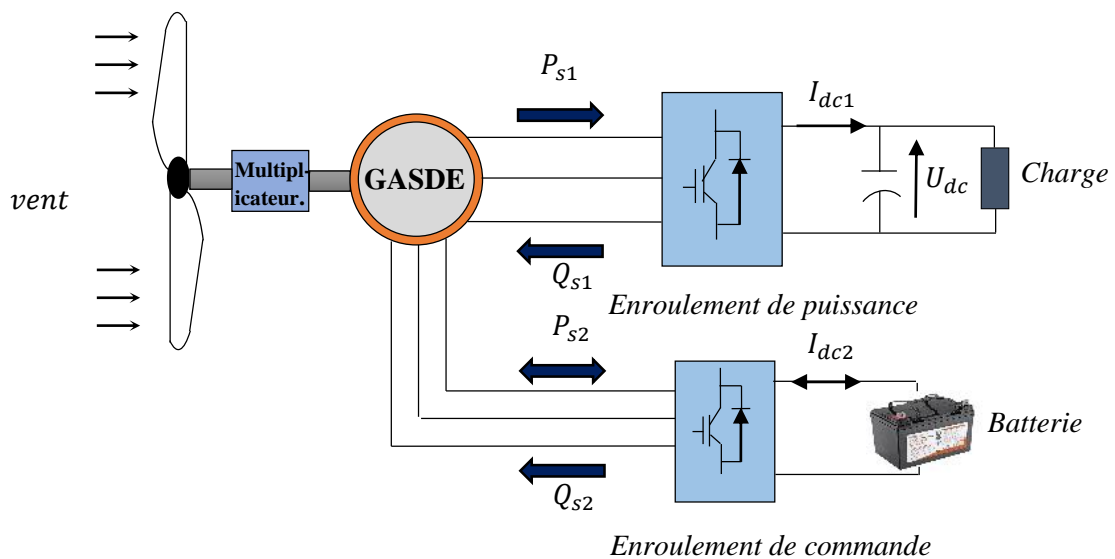


Figure (IV.1) : Représentation du système étudié

La machine asynchrone à double étoile possède deux ensembles d'enroulements au stator avec un même nombre de paires de pôles avec des fonctions différentes et séparées.

L'un des enroulements est appelé enroulement de puissance et fournit 75 % de la puissance de la GASDE à la charge via un pont redresseur, tandis que l'autre enroulement est appelé enroulement de commande et fournit 25 % de la puissance pour charger le banc de batteries via un convertisseur de puissance bidirectionnelle et restituer cette énergie pour alimenter l'enroulement de puissance à travers son champ magnétique et ceci en cas de vent faible comme indiqué sur la figure (IV.1).

IV.2.1 Modélisation du système éolien

IV.2.1.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne

La puissance maximale qui peut être produite (captée) par une éolienne présente sa puissance nominale. La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte est appelée vitesse nominale du vent. Au-dessus de celle-ci, la production de la puissance reste constante quel que soit la vitesse du vent jusqu'à atteindre une vitesse maximale, appelée vitesse maximale de fonctionnement à laquelle l'éolienne est conçue pour s'arrêter afin de protéger ses parties mécaniques des effets néfastes des grandes vitesses du vent. La vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne fonctionnera est connue comme la vitesse de seuil. Entre ses deux vitesses, la production de la puissance varie avec la vitesse du vent, comme il est illustré sur la figure (IV.2) [CHE15, BEN19].

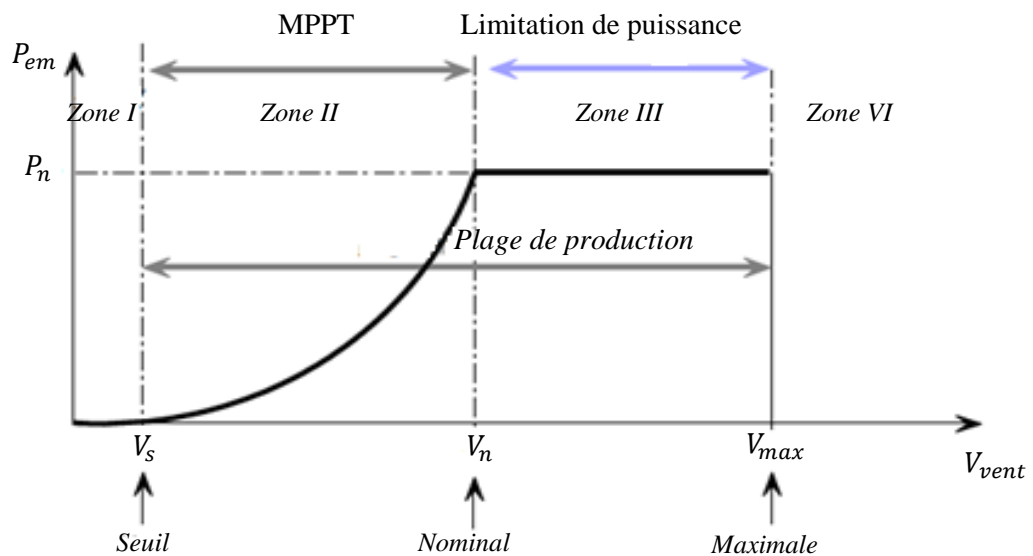


Figure (IV.2) : Zones de fonctionnement d'une éolienne

IV.2.1.2 Modélisation de la turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales identiques de longueur R_T fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation G . Ce multiplicateur entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique, (Figure IV.3) [ELA 04, ROU15].

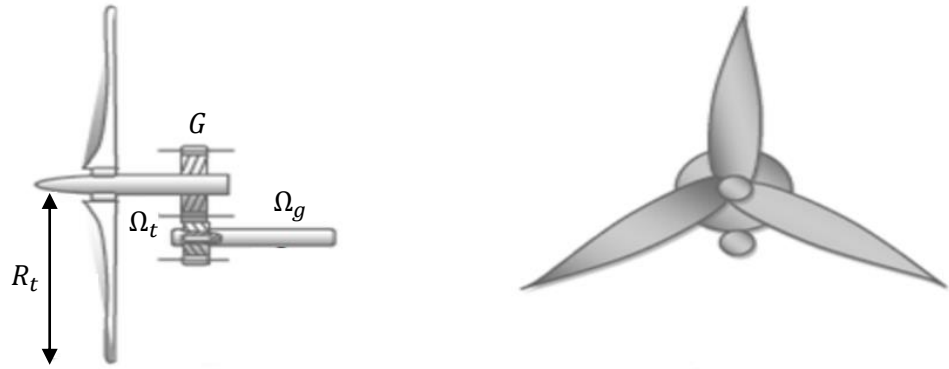


Figure (IV.3) : Schéma de la turbine éolienne

Avec ρ la densité de l'air qui est égale à 1.225 kgm^3 , la puissance aérodynamique du vent qui peut être récupérée est décrite par l'équation :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V_{vent}^3 \tag{IV.1}$$

La figure (IV.4) représente la variation du coefficient C_p en fonction du rapport de vitesse λ pour un angle de calage des pales β nul.

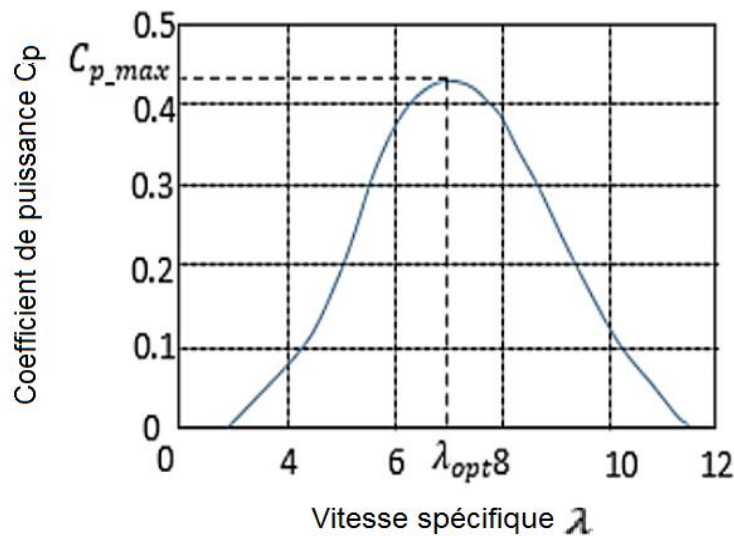


Figure (IV.4) : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse [HAM20]

La puissance du vent disponible n'est en réalité jamais totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est toujours inférieure à celle du vent, l'expression de la puissance mécanique captée par la turbine est donnée par l'équation (IV.2) :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S V_{vent}^3 \quad (IV.2)$$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. C'est un coefficient particulier à chaque éolienne qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β . Pour les éoliennes actuelles, on atteint des valeurs de 0.45 à 0.5.

Dans notre étude, le coefficient de puissance de la turbine utilisé est donné par l'expression (IV.3) :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \cdot \exp^{-\left(\frac{C_5}{\lambda_i}\right)} + C_6 \lambda_i \quad (IV.3)$$

D'où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (IV.4)$$

Les paramètres « $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ » dépendent des caractéristiques aérodynamiques de la turbine. Pour une turbine moderne, ces paramètres sont obtenus empiriquement dont : « $C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21, C_6 = 0.0068$ ». Ces valeurs sont données pour une turbine à trois pales, avec des caractéristiques aérodynamiques similaires au modèle d'éolienne utilisé dans ce travail. La valeur $\beta = 0^0$ est choisie pour obtenir le rapport de vitesse de pointe optimal λ [HOW14].

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales de rayon R et la vitesse du vent V_{vent} [BAT00, LAH10, AMI12] :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V_{vent}} \quad (IV.5)$$

Le couple aérodynamique est déterminé par la relation :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho}{2} S V_{vent}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (IV.6)$$

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par le gain du multiplicateur G comme le montre l'équation (IV.7)

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \quad (IV.7)$$

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 :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (IV.8)$$

A partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine est établi. Il montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée en agissant sur le couple électromagnétique du générateur. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système, comme le montre la figure (IV.5).

La vitesse du vent varie en fonction du temps et pour assurer une captation maximale de l'énergie éolienne incidente, la vitesse de rotation de l'éolienne doit être ajustée en permanence avec celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT).

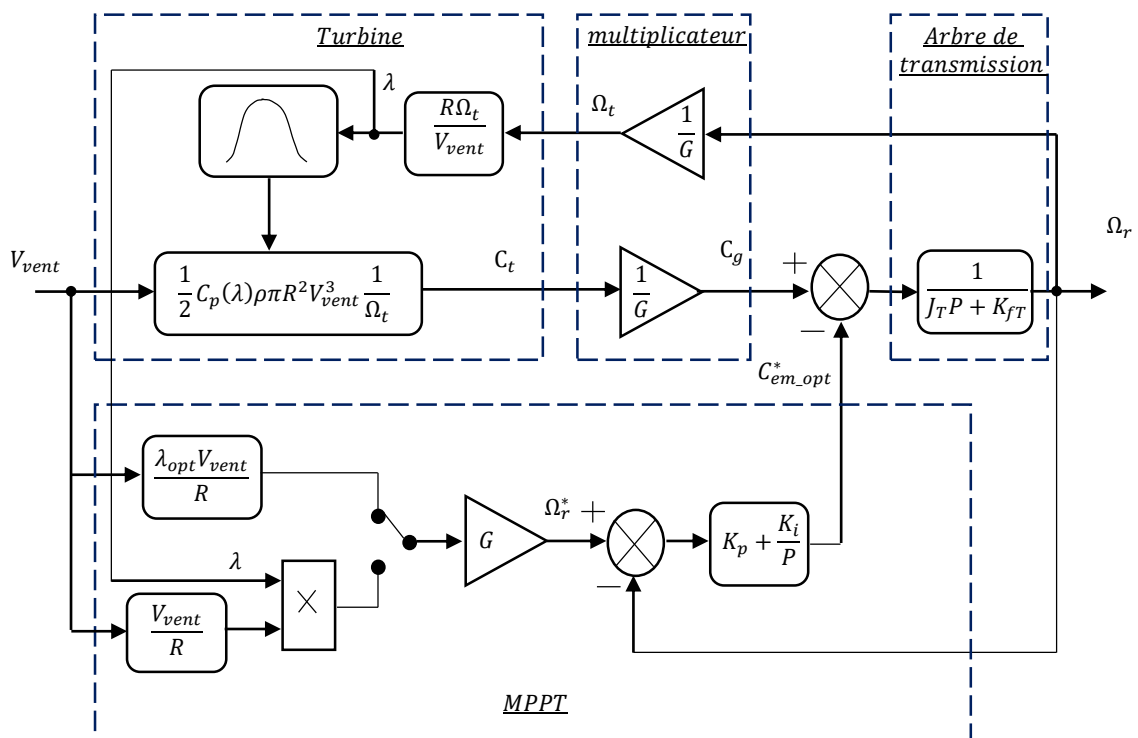


Figure (IV.5) : Schéma bloc du modèle de la turbine

IV.2.1.3 Technique d'optimisation de la puissance

La méthode MPPT permet de se placer au point de puissance optimale, quelle que soit la vitesse du vent, en imposant une vitesse de rotation optimale à la machine. La convergence de la recherche du point de puissance maximale est illustrée sur la figure (IV.6) dont la puissance aérodynamique extraite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine du système proposé est tracée pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent pour un angle de calage nul. Quand la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale de la turbine, une limitation en puissance est imposée au système éolien, en raison des contraintes électriques sur les éléments de chaîne de conversion.

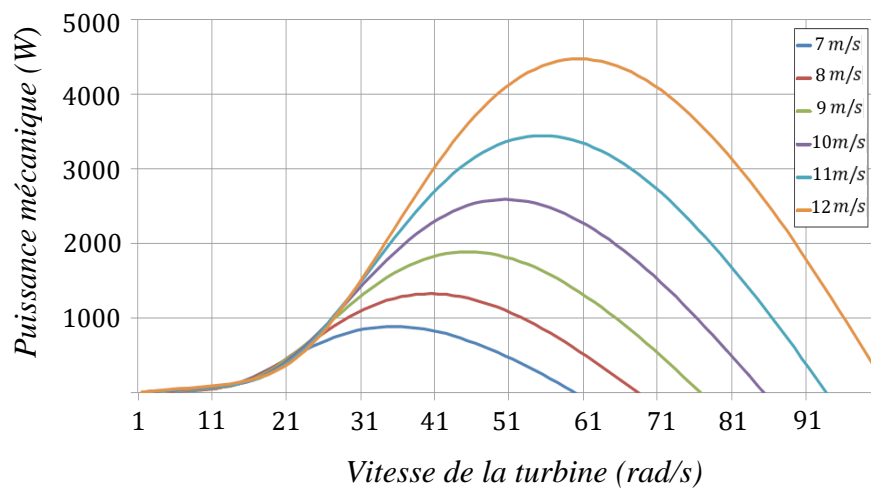


Figure (IV.6) : Courbe typique de la puissance extraite par la turbine en fonction de la vitesse du vent

Avec l'utilisation de cette méthode de contrôle, les systèmes éoliens peuvent ajuster en permanence leur vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent entrant, la vitesse de rotation de référence Ω_r^* peut être écrite comme :

$$\Omega_r^* = \left(\frac{V_{vent} \lambda_{opt}}{R} \right) \cdot G \quad (IV.9)$$

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches [POI03] :

- Contrôler la vitesse mécanique Ω_r afin d'avoir une consigne de vitesse Ω_r^* .
- Atténuer l'action du couple aérodynamique qui est une perturbation d'entrée.

Si la vitesse du vent est mesurée et que les caractéristiques mécaniques de l'éolienne sont connues, il est possible de déduire en temps réel la puissance mécanique optimale qui peut être générée en utilisant le suivi du point de puissance maximale (MPPT) [AOU06].

La puissance mécanique optimale peut être exprimée par :

$$P_{opt} = K_{opt} \Omega_r^3 \quad (IV.10)$$

$$\text{Où : } K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{p_max}}{\lambda_{opt}^2} \frac{\rho \pi R^5}{G^3}$$

Le couple électromagnétique de référence de l'enroulement de puissance C_{em1}^* serait obtenu en régulant la tension du bus continu et dépendrait de la valeur de la charge, par contre, le couple électromagnétique de référence de l'enroulement de commande C_{em2}^* serait obtenu en soustrayant la référence du couple électromagnétique de l'enroulement de puissance par le couple optimal total $C_{em_opt}^*$ comme :

$$C_{em_opt}^* = C_{em1}^* + C_{em2}^* \quad (IV.11)$$

Lorsque la puissance délivrée par la machine dépasse sa valeur nominale, la commande de limitation de puissance est activée afin de limiter les contraintes électriques sur le générateur, la puissance mécanique de référence est maintenue à sa valeur nominale :

$$P_{opt} = P_n \quad (IV.12)$$

IV.2.2 Application de la technique de régulation à la MASDE non identique

L'objectif de la commande est alors de maintenir constante la tension continue en sortie du redresseur. Cela peut être obtenu par le contrôle du flux et de la puissance transmise par la machine, c'est à dire son couple électromagnétique en fonction de la vitesse.

On retrouve alors les mêmes contraintes que pour la commande vectorielle d'une machine asynchrone fonctionnant en moteur, à savoir, le contrôle du flux et du couple électromagnétique indépendamment l'un de l'autre [IDJ 08-a].

Le contrôle des deux enroulements est différent. Tandis que la première étoile maintient la tension du bus DC constante pour alimenter la charge, la seconde étoile charge le banc de batteries par l'excès de puissance fournie par le vent et convertit le redresseur en onduleur pour réguler la puissance du premier stator en cas de vent faible en absorbant l'énergie emmagasinée dans le banc de batterie.

La puissance absorbée par la turbine est limitée à sa valeur nominale par l'algorithme MPPT associé. Le schéma général de la technique de régulation de puissance de la MASDE est présenté à la figure (IV.7) [HAM20].

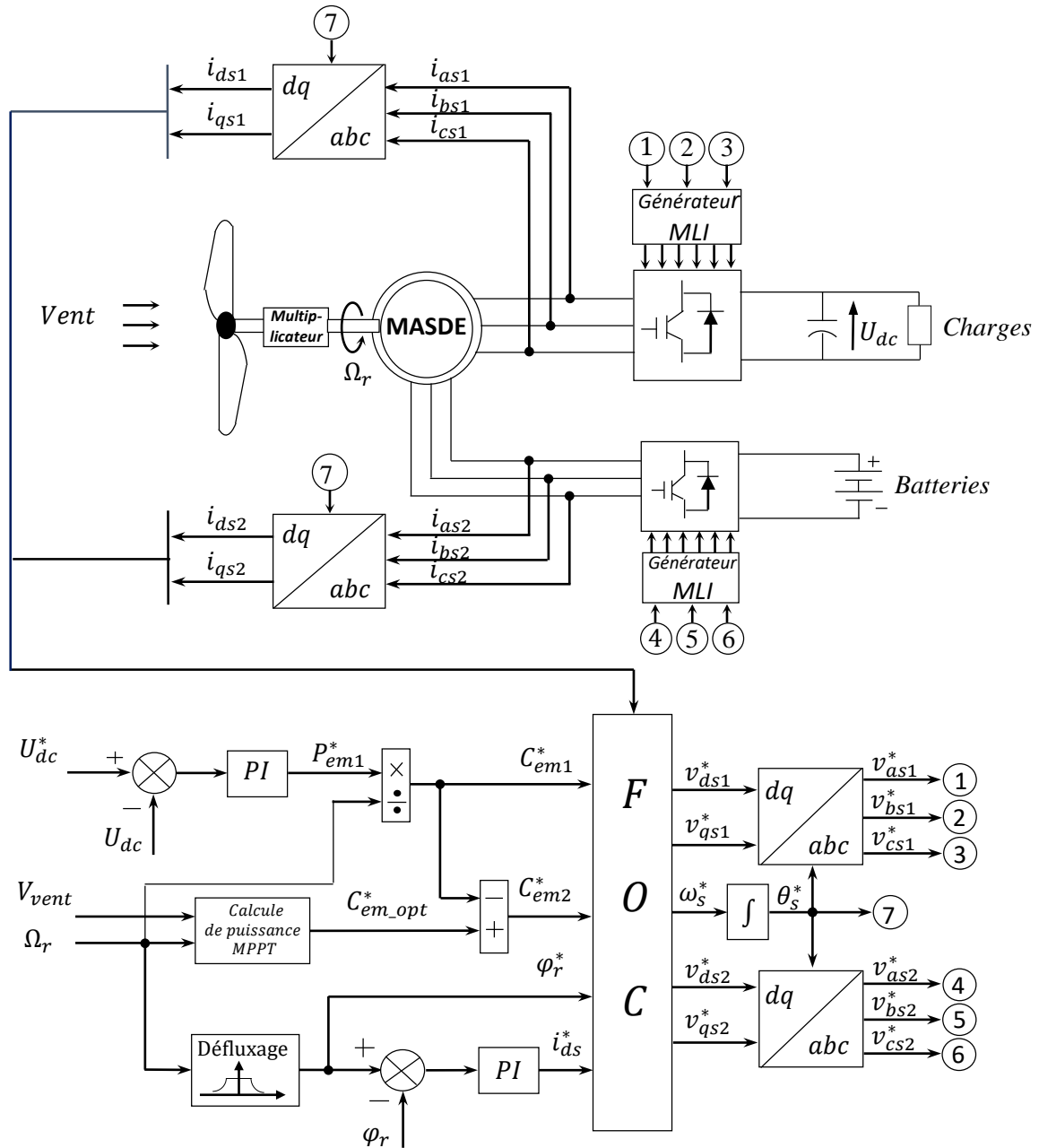


Figure (IV.7) : Système de contrôle de puissance de la MASDE

Dans cet ordre, nous proposons d'appliquer la commande vectorielle à flux orienté (FOC), qui consiste à maintenir la composante du flux en quadrature nulle ce qui nous permet de contrôler le couple indépendamment du flux.

Dans notre cas le couple de la deuxième étoile est calculé par une soustraction du couple de la première étoile de la valeur du couple maximal optimisé. La puissance de la première étoile est à 75% de la puissance totale de la machine, et celle de la deuxième étoile est à 25%.

On aura donc : $i_{ds}^* = i_{ds1}^* + i_{ds2}^*$ tel que : $i_{ds1}^* = 0.75 i_{ds}^*$ et $i_{ds2}^* = 0.25 i_{ds}^*$.

Le schéma fonctionnel de la boucle interne de la commande à flux orienté (FOC) est illustré par la figure (IV.8).

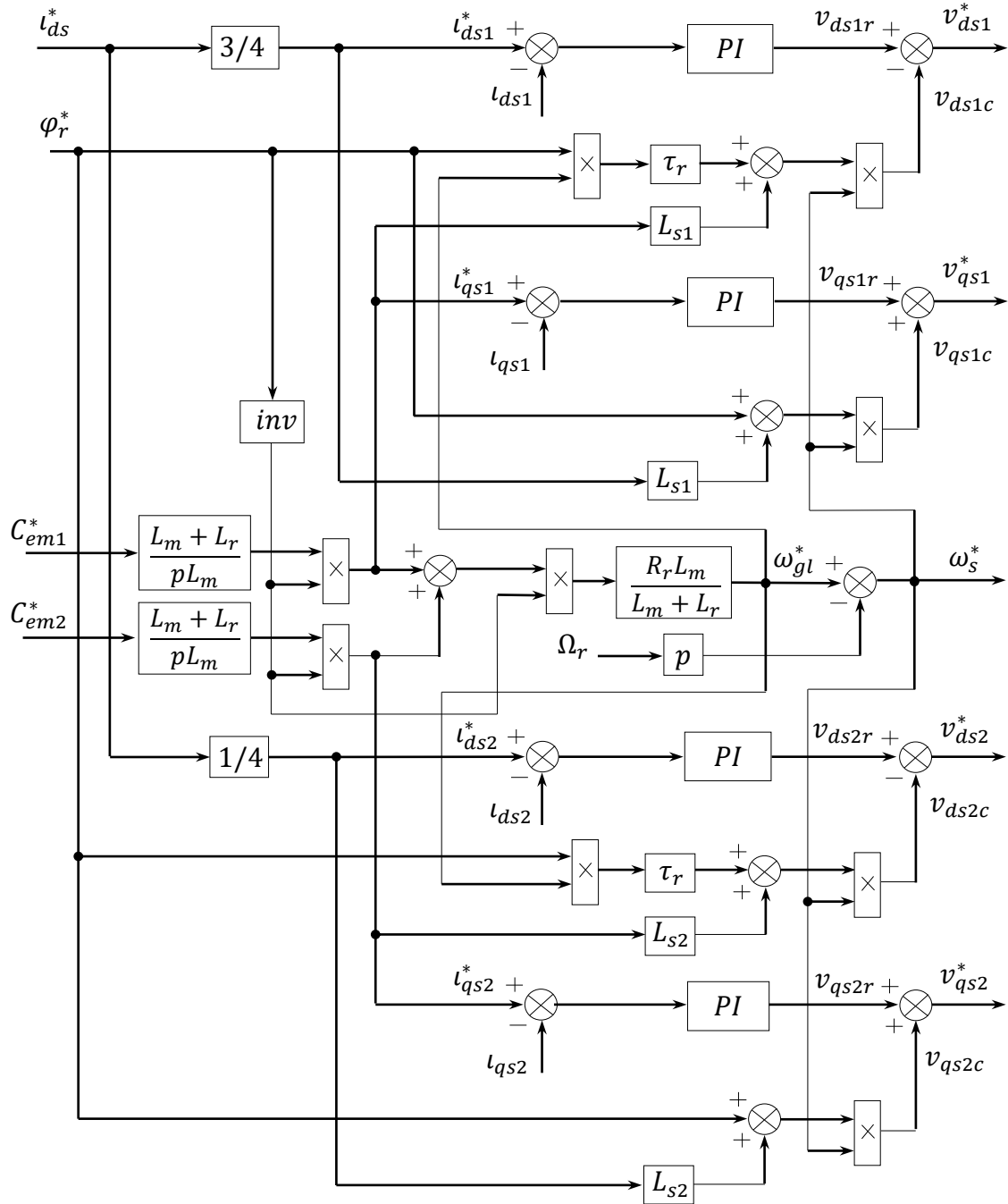


Figure (IV.8) : Schéma fonctionnel de la boucle interne de la commande (FOC)

IV.3 Simulation et interprétation des résultats

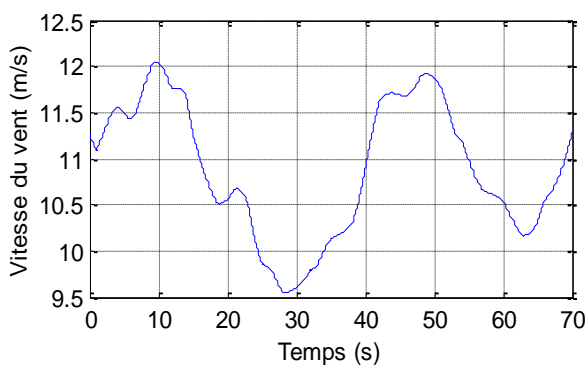
IV.3.1 Simulation de la MASDE avec profil de vent variable

La stratégie de contrôle proposée pour un système autonome d'alimentation en énergie éolienne à vitesse variable est réalisée par le logiciel Matlab/Simulink, les paramètres de la GASDE sont donnés dans l'annexe.

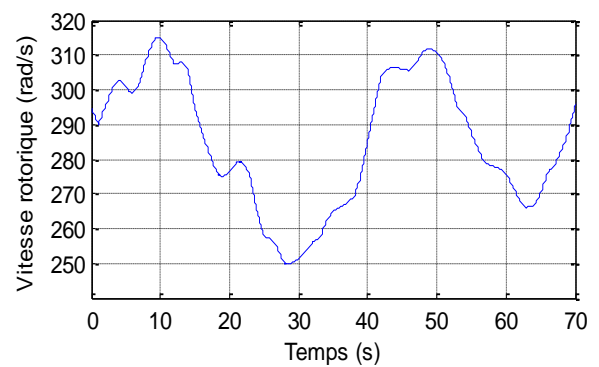
➤ **Alimentation d'une charge à puissance nominale**

Dans ce premier essai, la MASDE alimente une charge nominale de valeur 3375 W. Le profil du vent représenté sur la figure (IV.9.a) offre des vitesses de la MASDE illustrées par la figure (IV.9.b).

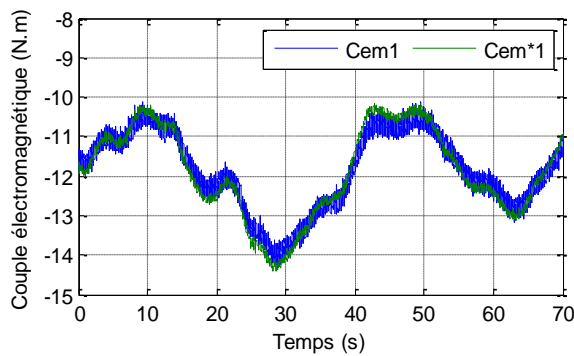
Dans ces conditions, on voit bien la régulation de la puissance de la première étoile qui est maintenue constante et égale à la valeur de la charge alimentée et ceci par la régulation de la puissance de la deuxième étoile qui restitue l'énergie de la batterie pour alimenter la première étoile pendant la faible vitesse du vent et stocke de l'énergie pendant la vitesse nominale donnée par les figures (IV.9.c) et (IV.9.d) respectivement.



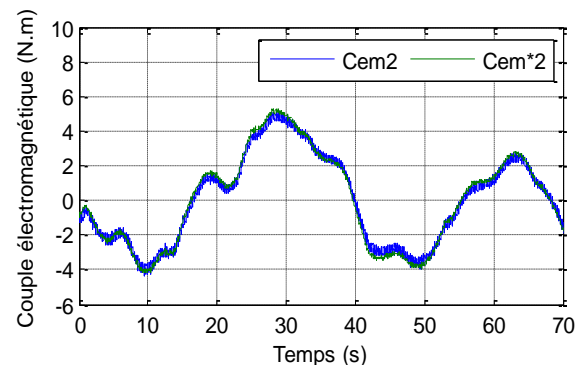
-(a)-



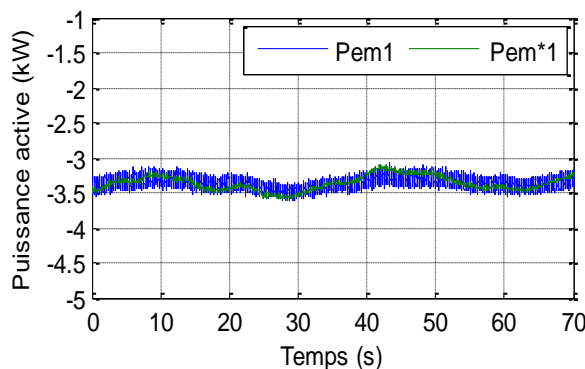
-(b)-



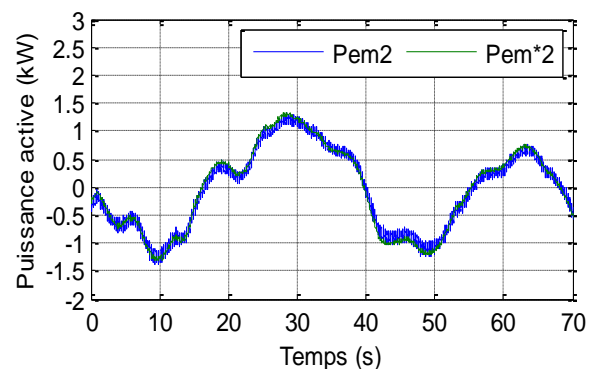
-(c)-



-(d)-



-(e)-



-(f)-

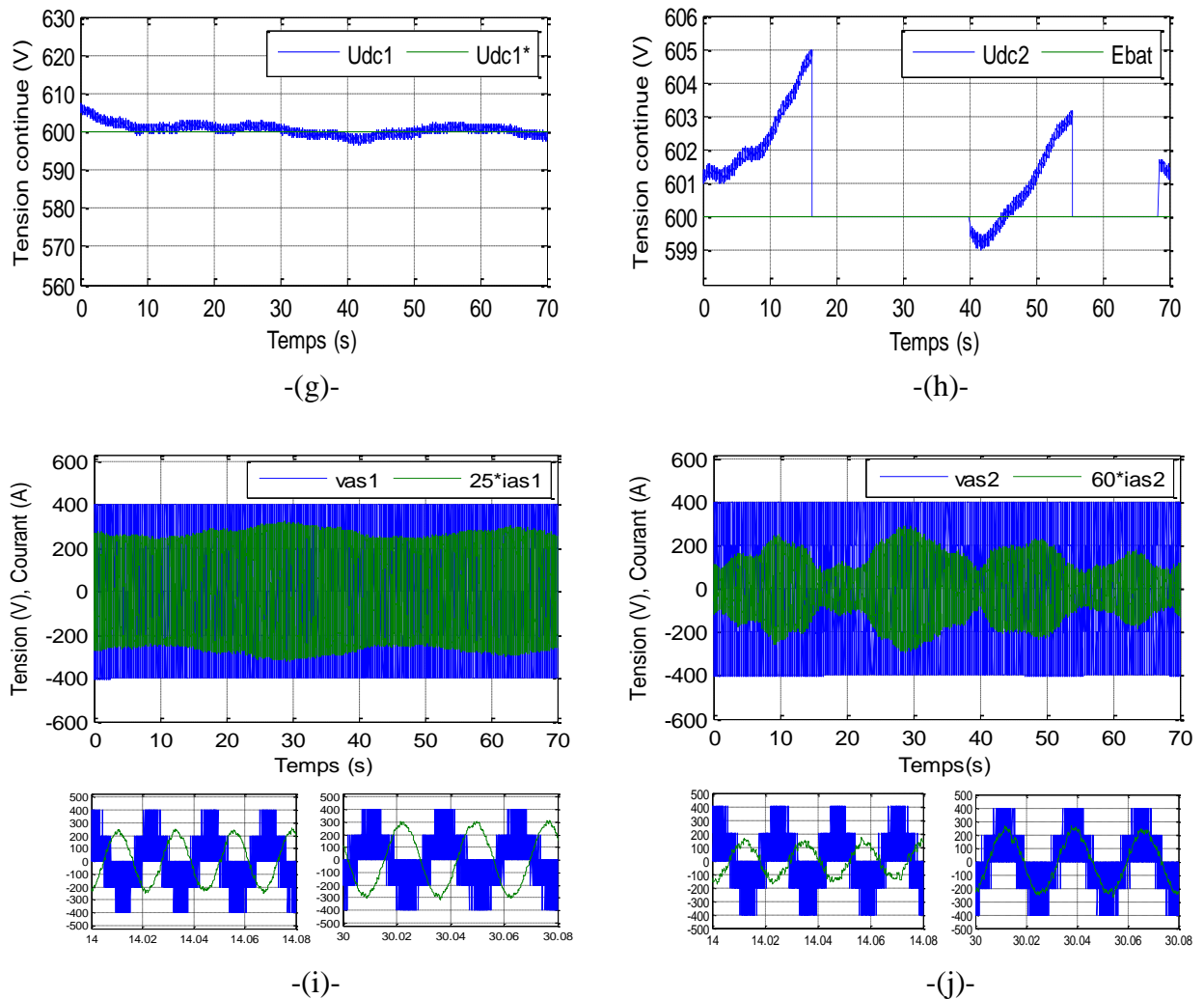


Figure (IV.9) : Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge nominale.

Le couple électromagnétique de la première étoile varie en fonction de la variation de la vitesse du rotor sans dépasser sa valeur nominale donnée par la figure (IV.9.e) et le couple électromagnétique de la deuxième étoile donne des valeurs positives pendant l'absorption de l'énergie de la batterie et des valeurs négatives pendant la charge illustrée par la figure (IV.9.f)

La tension du bus continu de la première étoile est bien régulée et suit sa valeur de référence donnée par la figure (IV.9.g) et la figure (IV.9.h), on voit bien les instants de charge et de décharge de la batterie correspondant à la variation de la vitesse du vent.

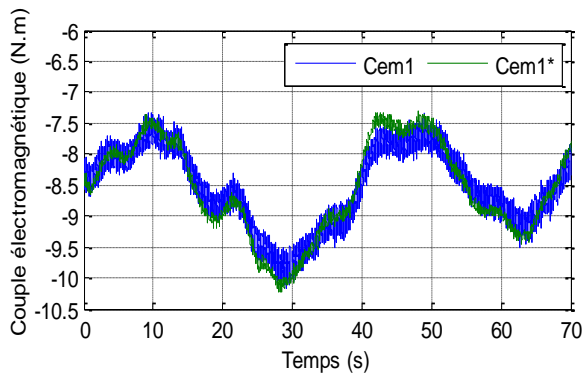
Le courant et la tension statoriques de la première étoile sont en opposition de phase, ce qui signifie qu'il fournit en permanence de la puissance active à la charge, contrairement à la deuxième étoile. Les allures des grandeurs caractéristiques sont, soit en opposition de phase lors de la charge de la batterie comme illustré par la figure (IV.9.i), soit en phase lors de la restauration de l'énergie comme montré par la figure (IV.9.j).

➤ **Alimentation d'une charge à 75% de puissance nominale**

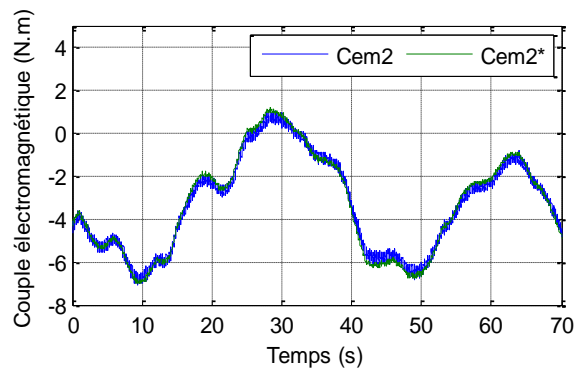
Avec le même profil de vitesse du vent, on alimente une charge à 75% de sa valeur nominale. Les résultats de simulation nous montrent bien que le couple électromagnétique de la première étoile suit la variation de la vitesse et diminue de 75% par rapport au couple à charge nominale figure (IV.10.a). Le couple électromagnétique de la deuxième étoile charge le banc de batterie avec un intervalle de temps supérieur à celui de la charge nominale et intervient pendant un petit intervalle de temps correspondant à la très faible valeur du vent (figure IV.10.b).

La puissance consommée par la charge reste constante et prend une valeur de 2.5 kW (figure IV.10.c) et la puissance de la deuxième étoile prend des valeurs qui dépassent la valeur nominale pendant la charge, ce qui nécessite une limitation de la puissance, figure (IV.10.d).

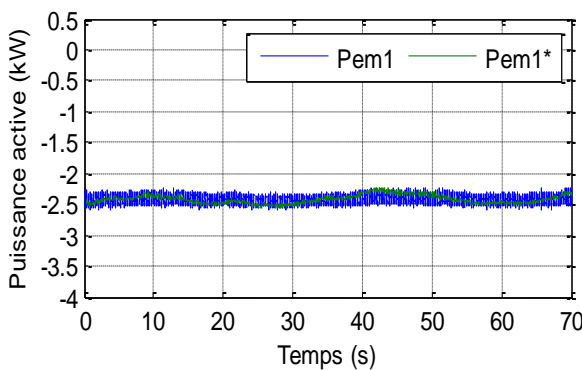
La figure (IV.10.e) montre la bonne régulation du bus continu et dans la figure (IV.10.f), on voit bien une moindre sollicitation du banc de batterie que dans le premier cas. La tension et le courant de la première étoile sont toujours en opposition de phase avec une légère diminution de la valeur du courant, figure (IV.10.g). Pour la deuxième étoile, on remarque une augmentation de la valeur du courant qui dépasse la valeur nominale et qui est due à la puissance disponible dans l'arbre de la machine dépassant la puissance demandée par la charge, figure (IV.10.h).



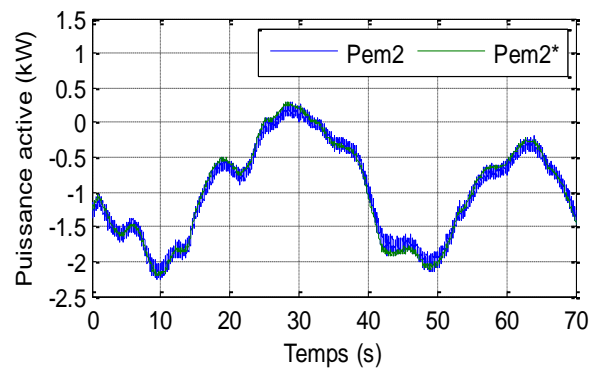
-(a)-



-(b)-



-(c)-



-(d)-

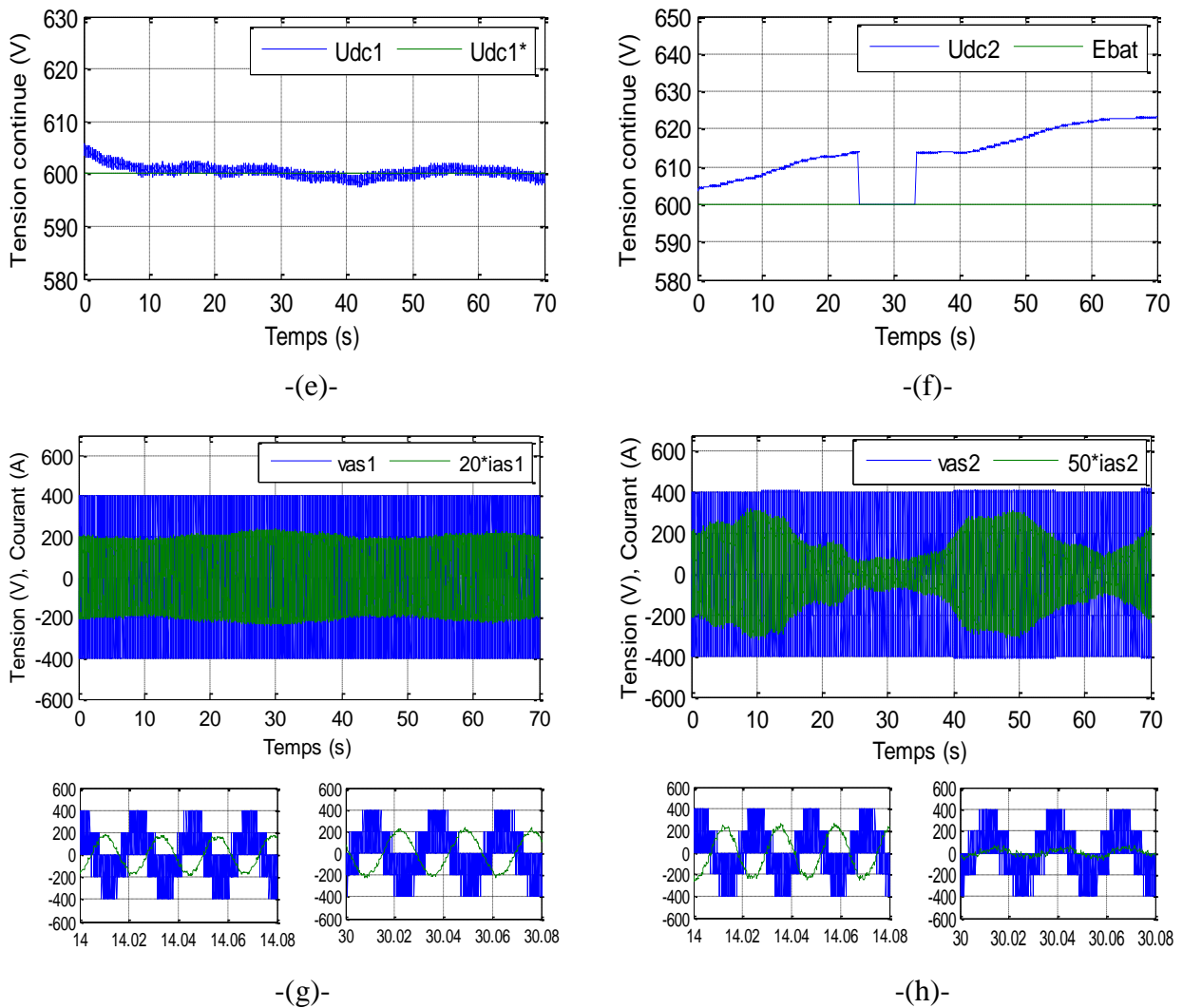


Figure (IV.10) : Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 75% de la puissance nominale

➤ **Alimentation d'une charge à 50% de puissance nominale**

Dans cette simulation, la MASDE alimente une charge à 50% de la puissance nominale. Les résultats de la simulation, nous montrent bien que la variation du couple électromagnétique de la première étoile en fonction de la vitesse du vent, figure (IV.11.a). Le couple électromagnétique de la deuxième étoile prend des valeurs qui dépendent de la variation de la vitesse du vent, figure (IV.11.b).

La puissance de la première étoile maintient une valeur constante qui correspond à la puissance consommée par la charge qui est de 1500 W, figure (IV.11.c), par contre, la puissance de la deuxième étoile connaît des variations qui dépendent de la variation de la vitesse du vent et prenant des valeurs négatifs correspondant à la charge du banc de batteries montré dans la figure (IV.11.d).

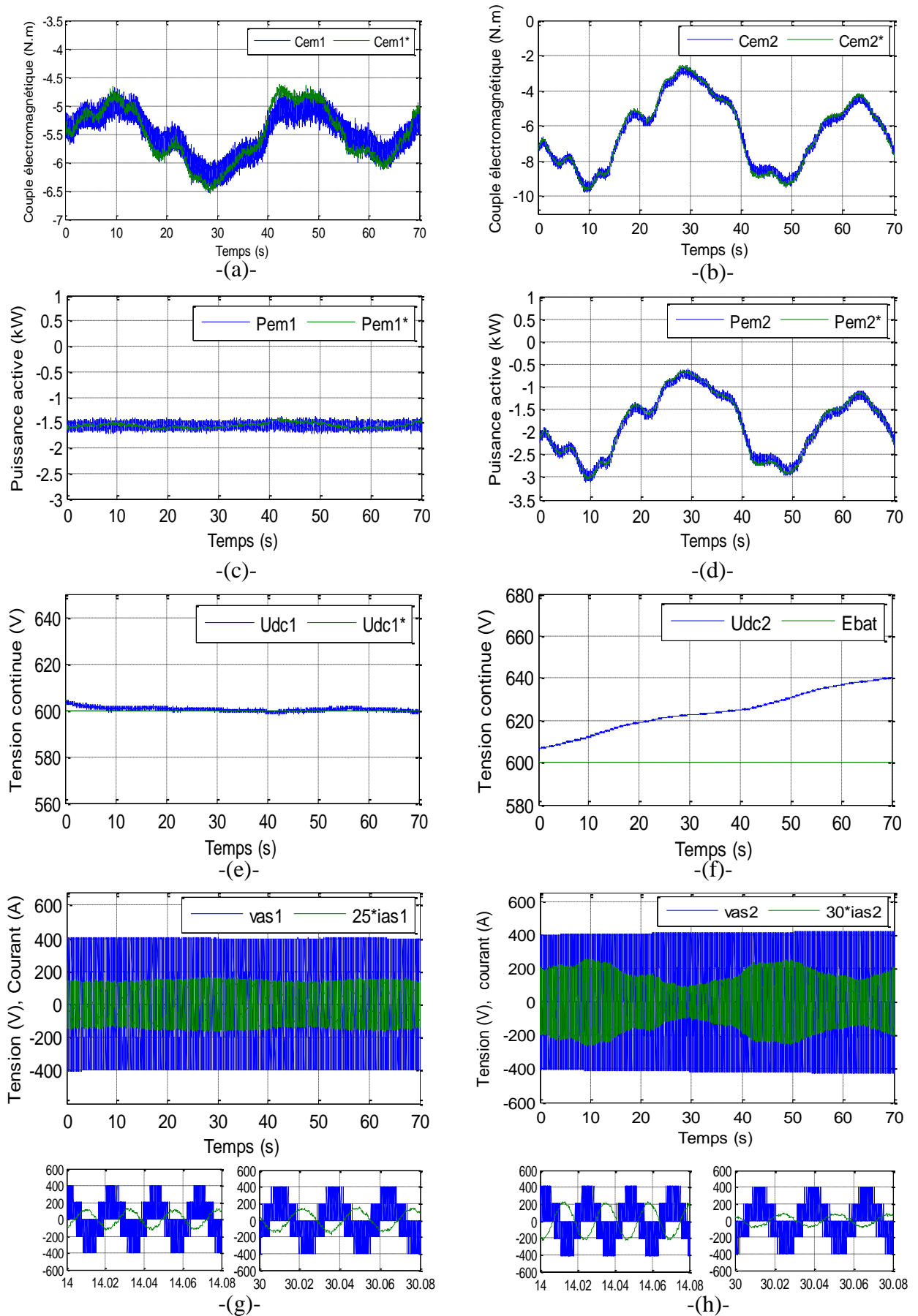


Figure (IV.11) : Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 50% de la puissance nominale

Néanmoins, cette puissance dépasse la valeur de la puissance nominale, à cause de la puissance disponible dans l'arbre de la machine non consommée par la charge, dans ce cas, une limitation de la puissance s'avère nécessaire pour le bon fonctionnement du système.

Le bus continu reste sur sa valeur de référence qui est de 600V, figure (IV.11.e) et la tension du bus continu de la deuxième étoile reste sur l'état de charge à cause de la puissance disponible sur l'arbre et la faible valeur de la charge, figure (IV.11.f).

La tension et le courant de la première étoile est toujours en opposition de phase, figure (IV.11.g) et la seconde étoile fournit en permanence de l'énergie au banc de batterie, néanmoins, la valeur du courant dépasse la valeur nominale, ce qui nécessite une limitation de la puissance transmise, figure (IV.11.h).

IV.3.2 Simulation de la MASDE avec limitation de la puissance

La puissance de référence de la deuxième étoile est limitée à sa valeur nominale avec application du même profil du vent, les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes :

➤ Alimentation d'une charge à 75% de puissance nominale

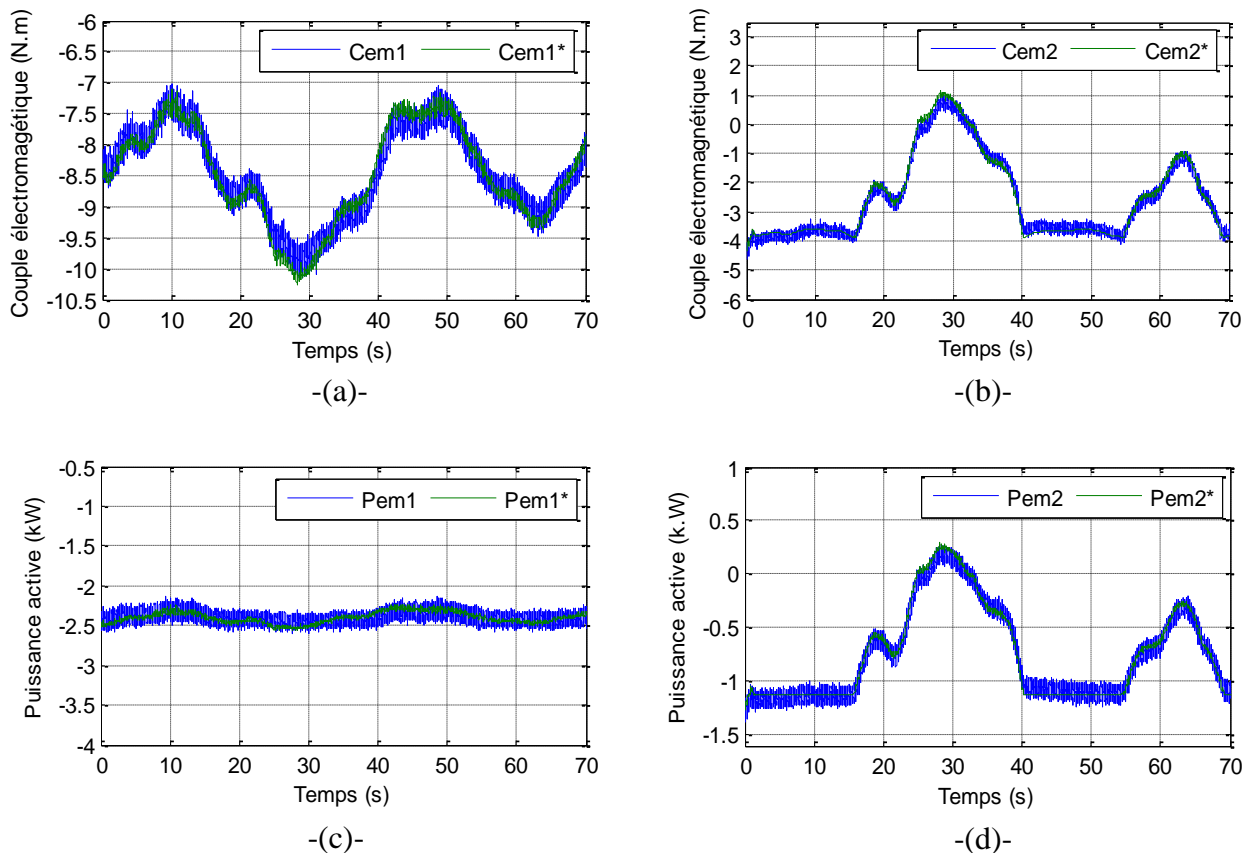


Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 75% de la puissance nominale avec limitation de puissance

La figure (IV.12) montre la simulation de la GASDE alimentant une charge à 75% de la puissance nominale avec limitation de la puissance transmise vers l'étoile de commande.

Les résultats de simulation montrent la bonne poursuite du couple électromagnétique de l'étoile 1 à sa valeur de référence figure (IV.12.a). Le couple électromagnétique de l'étoile 2 prend des valeurs qui correspondent à la variation de la vitesse du vent sans dépasser sa valeur nominale, figure (IV.12.b).

La puissance de l'étoile 1 reste sur sa valeur de consigne qui correspond à la puissance demandée par la charge, figure (IV.12.c). La puissance de l'étoile 2 varie en fonction du profil du vent pour la charge et la décharge du banc de batteries afin de compenser le manque de puissance de l'étoile 1, figure (IV.12.d). Dans cette simulation, on distingue la limitation de la puissance de l'étoile 2 à sa valeur nominale qui est de 1125 W afin de limiter le courant de charge et pour le bon fonctionnement du système.

➤ **Alimentation d'une charge à 50% de puissance nominale**

La figure (IV.13) montre les résultats de simulation de la GASDE alimentant une charge à 50% de la puissance nominale avec limitation de la puissance.

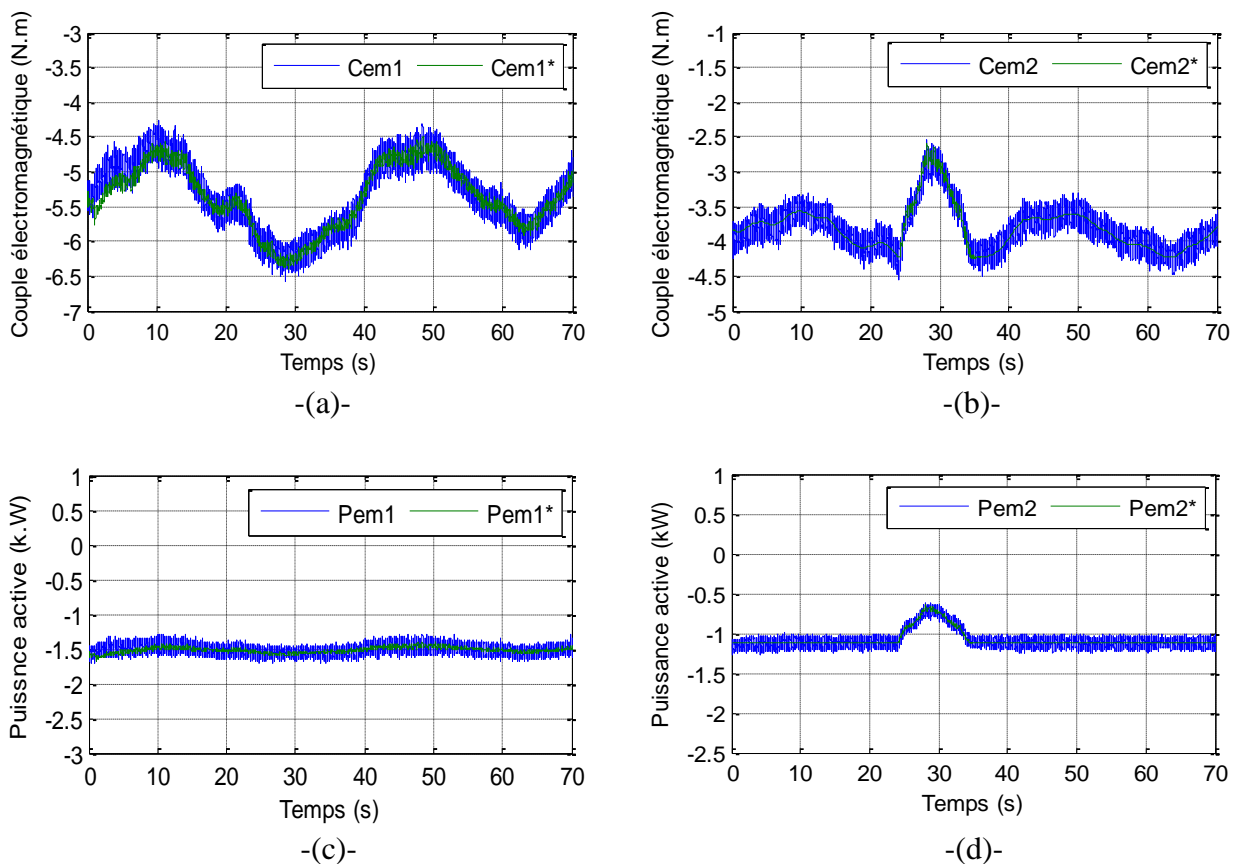


Figure (IV.13) : Résultats de simulation de la GASDE avec profil de vitesse variable alimentant une charge à 50% de la puissance nominale avec limitation de puissance

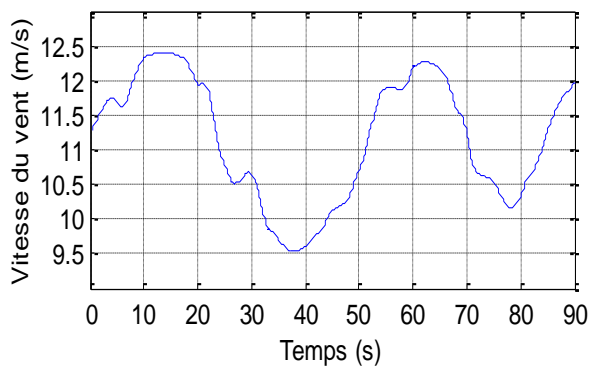
Dans cette simulation, le couple électromagnétique de l'étoile 1 suit sa référence qui dépend du profil du vent montré par la figure (IV.13.a) et le couple électromagnétique de l'étoile 2 varie en fonction de la variation de la vitesse du rotor en prenant des valeurs au-dessous de sa valeur nominale, figure (4.13.b).

La puissance de l'étoile 1 est maintenue à sa valeur correspondant à la puissance demandée par la charge, figure (4.13.c) et la puissance de l'étoile 2 reste en permanence en état de charge du banc de batterie vue la disponibilité de la puissance sur l'arbre de la machine toute en se limitant à sa valeur nominale qui est de 1125 W illustré dans la figure (4.13.d).

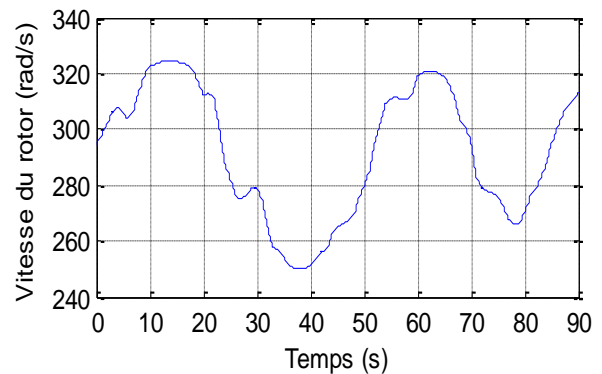
IV.3.3 Simulation de la MASDE en survitesse

La machine est soumise à un profil de vent en survitesse tout en aimantant une charge d'une valeur nominale où les résultats de simulation sont montrés par la figure (IV.14).

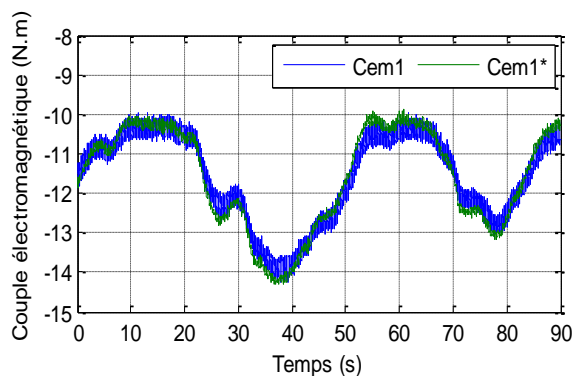
Le profil du vent est représenté par la figure (IV.14.a), ce qui engendre un profil de vitesse de la MASDE illustré dans la figure (IV.14.b). Dans ces conditions, le couple électromagnétique de l'étoile 1 varie en fonction de la variation de la vitesse du rotor, figure (IV.14.c) et le couple électromagnétique de l'étoile 2 prend des valeurs positives et négatives correspondant à la charge et à la décharge du banc de batteries, figure (IV.14.d).



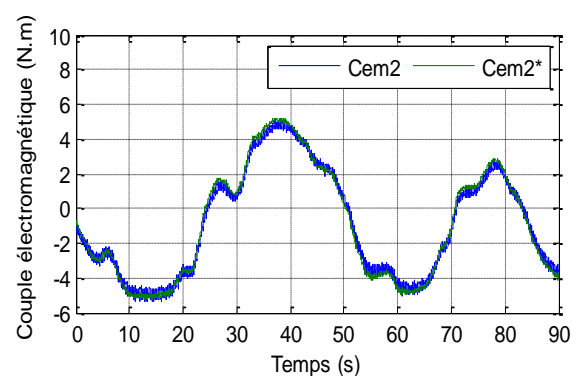
-(a)-



-(b)-



-(c)-



-(d)-

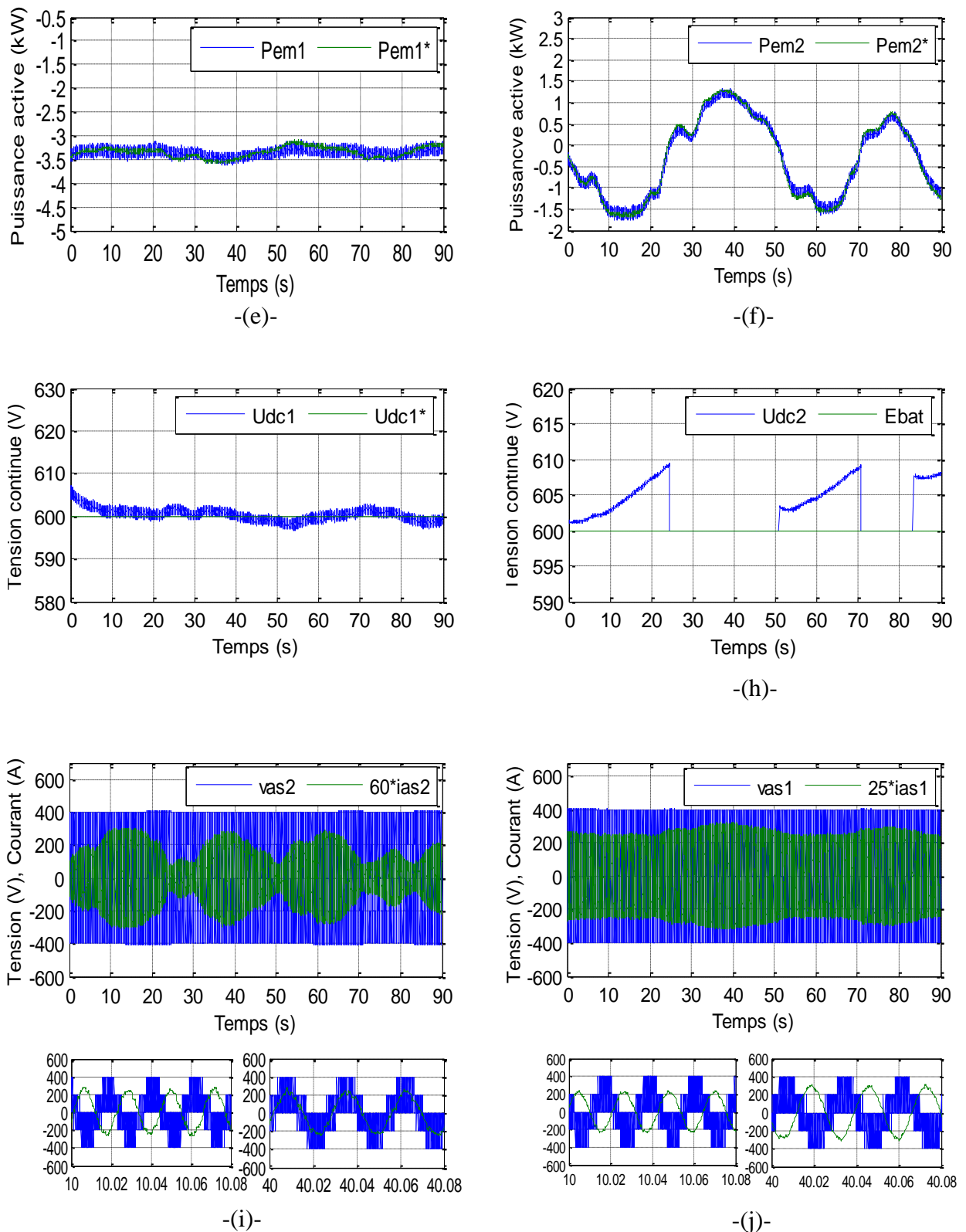


Figure (IV.14) : Résultats de simulation de la GASDE avec un profil de vent en survitesse alimentant une charge nominale

La puissance de l'étoile 1 est toujours régulée et égale à la puissance demandée par la charge qui est de 3375 W, figure (IV.14.e) et la puissance de l'étoile 2 prend des valeurs correspondant à la charge et à la décharge des batteries illustrée par la figure (IV.14.f).

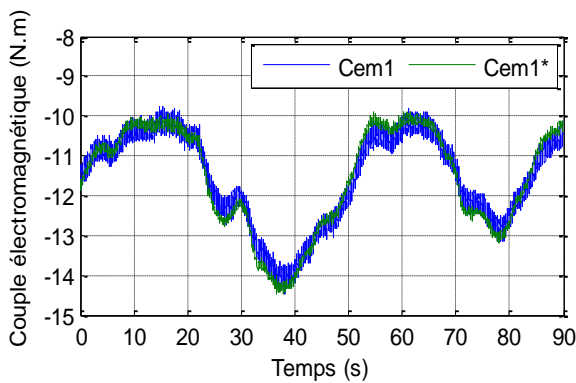
Le passage en survitesse provoque une surproduction de la puissance au niveau de l'étoile 2 qui dépasse la valeur nominale, ce qui nécessite de faire une limitation de la puissance.

Le bus continu de l'étoile 1 est maintenu à sa valeur de référence, figure (IV.14.g) et le bus continu de l'étoile 2 prend des valeurs correspondant à la charge et la décharge des batteries comme est montré dans la figure (IV.14.h).

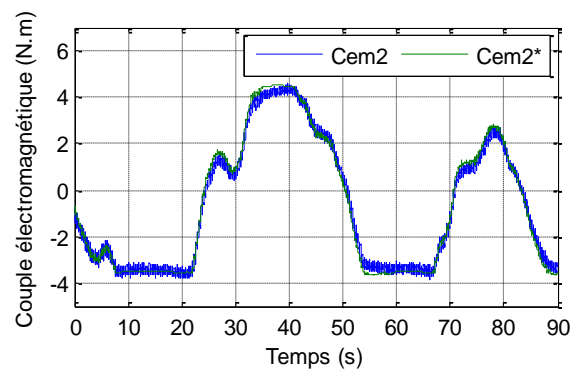
Le courant et la tension de l'étoile 1 sont toujours en opposition de phase en alimentant la charge nominale, figure (IV.14.i) et en phase ou en opposition de phase correspondant au transfert de puissance pour l'étoile 2 montré dans la figure (IV.14.j). Le passage en survitesse provoque une élévation de la valeur de courant de charge au-dessus de sa valeur nominale, ce qui nécessite une limitation de puissance.

IV.3.4 Simulation de la MASDE en survitesse avec limitation de la puissance

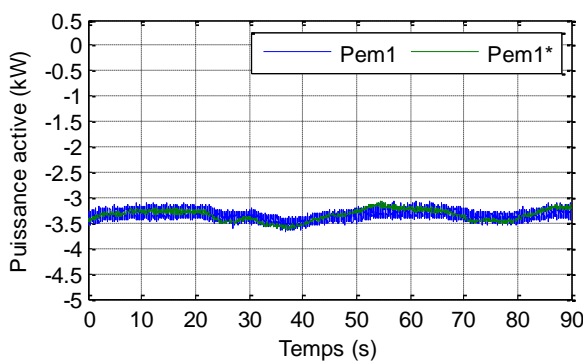
Les résultats de simulation de la GASDE en survitesse avec limitation de la puissance sont illustrés sur la figure (IV.15). Il apparaît bien que le couple électromagnétique de l'étoile 1 varie en fonction du profil du vent, figure (IV.15.a) et le couple électromagnétique de l'étoile 2 prend des valeurs positives et négatives en fonction de la charge et la décharge des batteries sans dépasser la valeur nominale, figure (IV.15.b).



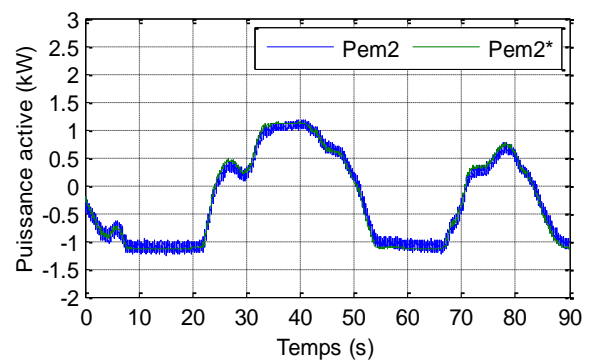
-(a)-



-(b)-



-(c)-



-(d)-

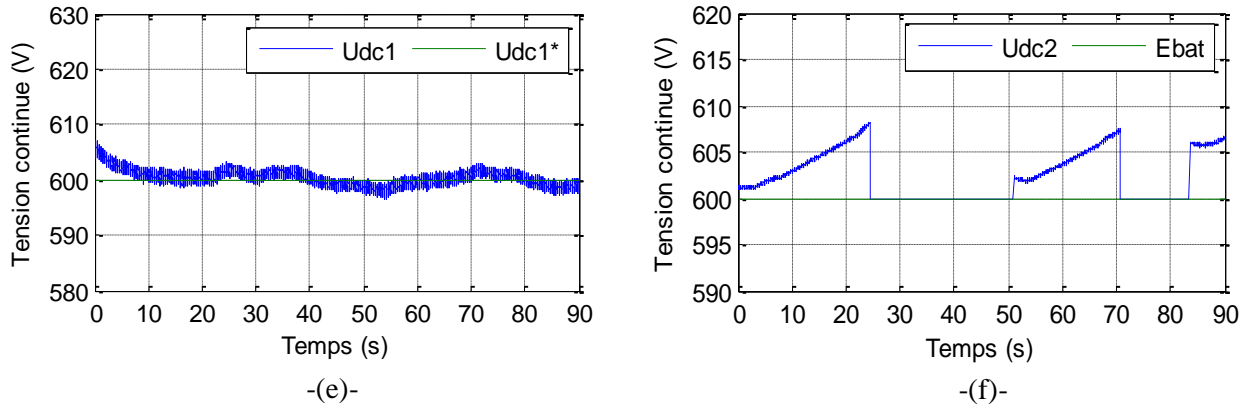


Figure (IV.15) : Résultats de simulation de la GASDE avec un profil de vent en survitesse alimentant une charge nominale avec limitation de puissance

La puissance de la première étoile est maintenue constante, correspondant à la puissance demandée par la charge, figure (IV.15.c). La figure (IV.15.d) montre bien la limitation de la puissance de l'étoile 2 à sa valeur nominale, ce qui va limiter le courant de charge et garantir un bon fonctionnement du système.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouveau contrôle de puissance et de régulation de bus continu d'une machine asynchrone à double étoile à paramètres non identiques a été présenté. Les résultats de simulations de cette nouvelle stratégie de contrôle ont montré ses performances à travers la régulation du bus continu utilisant le contrôle orienté du flux et la compensation de puissance active de l'étoile 1 avec l'énergie disponible dans le banc de batterie connecté à l'étoile 2 en calculant la puissance manquante, ce qui est intéressant pour les applications éoliennes à vitesse variable.

La première partie de simulation, nous a montré une bonne régulation de la puissance de l'étoile 1 pendant l'alimentation de la charge, néanmoins, une surproduction de puissance est apparue dans l'étoile 2 pendant l'alimentation des charges inférieures à la charge nominale. Pour y remédier, une limitation de puissance est appliquée afin de ne pas dépasser la puissance nominale.

Dans la deuxième partie, nous avons appliqué un profil de vent en survitesse sur la MASDE, ce qui nous a donné une surproduction de la puissance au niveau de l'étoile 2. Dans ce cas, la limitation de puissance sera appliquée, ce qui montre la bonne régulation de puissance du système étudié.

Conclusion générale

Cette thèse est consacrée à l'étude de la génératrice asynchrone à double étoile appliquée dans une éolienne à vitesse variable et autonome avec des paramètres non identiques et un fonctionnement séparé des deux étoiles.

Les configurations appliquées à la machine asynchrone à double étoile dans un fonctionnement éolien autonome sont mises en exergue dans le premier chapitre avant d'entamer une modélisation et des simulations de la MASDE avec deux étoiles à paramètres électriques identiques et non identiques dans le second chapitre.

Afin de mieux maîtriser la machine, un modèle mathématique basé sur la théorie unifiée des machines électriques est établi tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices. La transformation de Park permet le passage d'un modèle triphasé à un modèle biphasé pour simplifier la modélisation. Afin de suivre l'évolution des grandeurs caractéristiques de la MASDE, deux onduleurs de tension à commande MLI sont utilisés pour alimenter les deux étoiles du stator avec des paramètres identiques et non identiques.

Le troisième chapitre est dédié à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique directe et indirecte. La régulation de la vitesse par la méthode directe est bien meilleure, néanmoins, la fragilité et les problèmes de fiabilité des capteurs de flux, limitent la mise en œuvre de cette méthode. Ainsi, les algorithmes de réglage classiques, tel que les PI peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop strictes.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude du système proposé, à savoir la machine asynchrone à double étoile, à paramètres non identiques des deux étoiles et ayant des fonctionnements différents, dédiée à un système éolien à vitesse variable.

Pour maintenir le bus continu constant, nous avons appliqué la commande vectorielle à orientation du flux rotorique afin d'alimenter une charge autonome où un système de régulation de puissance est appliqué.

L'étoile de commande charge la batterie de stockage en cas de vent suffisant via un convertisseur bidirectionnel en fonctionnement redresseur et restitue l'énergie stockée via le même convertisseur en fonctionnement onduleur pour alimenter le bobinage de commande. Cette énergie sera transmise par induction électromagnétique au bobinage principal afin de maintenir constante la puissance transmise à la charge en cas de vent faible.

Les résultats de simulations ont montré la bonne réponse à la régulation de puissance pour les différentes valeurs de la charge et les différents profils du vent. Une limitation de puissance transmise vers la batterie s'avère nécessaire dans le cas de faible valeur de la charge et dans le cas de vitesse de vent élevée, ce qui nous permet de valider le système proposé.

D'après les résultats obtenus et les observations enregistrées, des perspectives de recherches et de réalisations pratiques intéressantes sont envisageables pour contribuer à mieux exploiter la machine, à savoir :

- ❖ Remplacement des onduleurs de tensions par des convertisseurs matriciels ;
- ❖ Utilisation des onduleurs multi-niveaux ;
- ❖ Application des commandes robuste et adaptative pour la régulation de tension.
- ❖ Application des nouvelles techniques de maximisation de puissance.
- ❖ Etude de la MASDE en régime dégradé ;
- ❖ Etude expérimentale de chaque voie de recherche.

Bibliographie

- [ABD07] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [ADJ22] A. Adjati, « Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage hybride à énergies renouvelables », Thèse de doctorat en sciences, université A-Mira de Bejaia, Algérie 2022.
- [ALL05] S. Alloune, « Commande des Machines Polyphasés », Mémoire de Magister de l'université de Bejaia, Algérie 2005.
- [AMI12] H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile », thèse de doctorat en science de l'université de Batna, 2012.
- [AOU06] D. Aouzellag,., K., Ghedamsi, E.M. Berkouk , « Power control of a variable speed wind turbine driving an DFIG. Renewable Energy and Power Quality » Journal, Vol. 1. <https://doi.org/10.24084/repqj04.220>, 2006
- [ARO07] G. Aroquiadassou, H. Henao, G-A. Capolino, « Experimental analysis of the dqo stator current component spectra of a 42v fault-tolerant six-phase induction machine drive with opened stator phases », in IEEE Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED., pp. 52-57, 2007.
- [AZI09] A. Azib, « Etude et Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée par Convertisseurs Matriciels », Mémoire de magister de l'université de Bejaia, 2009.
- [BAG99] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, France, 1999.
- [BAT00] H. D. Battista, R. J. Mantz, C. F. Christiansen, « Dynamical sliding mode power control of wind driven induction generators », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 4, pp. 451–457, 2000.
- [BEN13] A. Benlamoudi, « Contribution à la commande de la génératrice asynchrone à cage entraînée par une turbine éolienne ». Thèse doctorat, Université de Batna, 2013.

-
- [BEN19] M. Benakchai, « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile GASDE », Thèse doctorat, Université de M'Sila, 2019.
- [BER04] D. Berbier, « Machine asynchrone à double stator alimentée par onduleurs à trois niveaux à structure NPC », mémoire de magister de l'école nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2004.
- [BOY06] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.
- [CAM03] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [CAR01] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, « The history and state of art of variable-speed wind turbine technology", NREL/TP-500-28607, 2001.
- [CHA02] L. Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review, pp. 1-5, 2002.
- [CHE15] S. Chekkal, « Intégration des Génératrices Asynchrones à Double Etoiles dans un Système Eolien », Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, 2015.
- [CHE18] N. Cherfia « Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne ». Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [CRE18] CREG. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015–2030. [http:// www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf](http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf)
- [CRE97] G. Crellet, G. Clerc, « Actionneurs électriques », Edition Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [CIM05] G. O. Cimuca, « System inertiel de stockage d'énergie associer à des générateurs éoliens », Thèse de doctorat de l'Ecole National supérieur d'art et métier Centrale de Lille (ECL), France, 2005.
- [COU08] V. Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi-sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [DAA18] H. Daaou Nedjari, « L'énergie éolienne en Algérie » Bulletin des Energies Renouvelables N°46, 2018

-
- [DAH15] M. Dahmane « Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome », Thèse de Doctorat de l'école Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585) de l'Université de Picardie Jules Verne, 2015.
- [DAT02] R. Datta and V. T. Ranganathan, « Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine a Comparison With Alternative Schemes », *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 17, No. 3, pp 414-421, 2002
- [DAV07] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [DEN10] A. Dendouga, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, 2010.
- [DID06] J. Didat, « Etude de l'association des convertisseurs de puissance dans une chaîne éolienne de petite puissance ». Thèse doctorat, l'Université Montpellier II, 2006.
- [ELA 04] S. El aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École centrale de Lille 2004.
- [ERR12] Y. Errami,; M. Maaroufi,; M. Ouassaid, « Variable Structure Direct Torque Control and grid connected for wind energy conversion system based on the PMSG ». *Complex Systems (ICCS)*, International Conference on, vol., no., pp.1,6, 2012.
- [EPS09] G. Espana, « Étude expérimentale du sillage lointain des éoliennes à axe horizontal au moyen d'une modélisation simplifiée en couche limite atmosphérique ». Thèse de doctorat, Université D'Orléans, 2009.
- [FAR05] F. A. Farret, B. Palle et M. G. Simoes, « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », *IEE Proc-Electr, Power Appl*, vol 152, No 1, 2005.
- [FEI12] B. Feifei, W. Huang, Y. Hu, J. Shi and K. Shi, « A Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator Variable Frequency AC Power System », in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 10-13, doi: 10.1109/TPEL.2011.2157170, 2012.
- [FEI14] B. Feifei and all, « Control strategy and dynamic performance of dual stator-winding induction generator variable frequency ac generating system with

- inductive and capacitive loads », IEEE transactions on power electronics, vol. 29, no. 4, 2014.
- [GHE08] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E.M. Berkouk, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system », Renew Energy, 33(9): 2145-2156. <https://doi.org/10.1016/j.renene>, 2008.
- [GHE11] T. Ghannem, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse doctorat, Ecole centrale de Lille et école militaire polytechnique d'Alger, 2011.
- [GUA04] H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon, « Utilisation des supercondensateurs pour les stockage de l'énergie embarquée : Applications transport », Revue de l'Electricité et de l'Electronique -(07): 83 Doi:10.3845/ree.2004.075, 2004.
- [GUE17] A. K. Guediri « Etude et commande d'une chaine de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension », Thèse de doctorat en science de l'Université Mohamed Khider, Biskra, 2017.
- [HAD01] D. Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structures », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, France, 2001.
- [HAD20] C. Hadji, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double étoile », Thèse de doctorat en science de l'Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2020.
- [HAM13] K. Hamitouche, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaine de traction ferroviaire », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2013.
- [HAM16] F. Hamoud, M. L. Doumbia, A. Cheriti « Performance study of a self-excitation dual stator winding induction generator for renewable distributed generation systems ». Smart Grid and Renewable Energy, 7,197-215, 2016,
- [HAM20] K. Hamitouche, S. Chekkal, H. Amimeur, D. Aouzellag “ A new control strategy of dual stator induction generator with power regulation” Journal Européen des Systèmes Automatisés:53:469-478, 2020
- [HEL19] E. Hellel « Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources », Thèse de doctorat 3ème cycle, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.

- [HOW14] A.M. Howlader, N. Urasaki, A.Y.Saber, "Control strategies for wind-farm-based smart grid system". IEEE Transactions on Industry Applications, 50(5): 3591–3601. <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2304411> , 2014
- [IDJ08] K. Idjdarene, « Contrôle d'une génératrice asynchrone à cage dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Journées des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE'08), Lyon, France, pp. 1-6, 2008.
- [IDJ08-a] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua et A. Tounzi, « Vector control of autonomous induction generator taking saturation effect into account », Energy Conversion and Management, Elsevier Science, vol. 49, Issue 10, pp. 2609-2617, 2008.
- [IDJ10] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrone à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », thèse de doctorat de l'université de Bejaia, Algérie, 2010.
- [IEA18] Rapport de l'International Energy Agency IEA Disponible en ligne via : https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/china_wind.pdf.
- [KEL00] C. Kelber, W. Schumacher, "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines", VSSH 2000. European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 2000.
- [KLI83] E. A. Klingshirn, « High phase order induction motors-part 2-experimental results», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 1, p. 54-59, 1983.
- [KIY20] B. Kiyour, « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile », Thèse de doctorat en science, université Mohamed Khider de Biskra, 2020
- [LAH10] N. A. Lahacani, D. Aouzellag, B. Mendil, "Static compensator for maintaining voltage stability of wind farm integration to a distribution network", Renewable Energy Journal, Vol. 35, pp. 2476–2482, 2010.
- [LEC04] L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [LEV12] E. Levi, I.N.W. Satiawan, N. Bodo, M. Jones, "A space-vector modulation scheme for multilevel open-end winding five-phase drives", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 1, pp. 1-10, 2012.

-
- [LUB03] T. Lubin, « Modélisation et commande de la machine synchrone à réluctance variable. Prise en compte de la saturation magnétique. », Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [MAC89] M. Machmoum, "Contribution à l'Etude et la Commande Numérique de l'Ensemble Cyclonconvertisseur Triphasé - Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
- [MER11] E. Merabet, H. Amimeur, F. Hamoudi, R. Abdessemed, "Self-tuning fuzzy logic controller for a dual star induction machine", Journal of Electrical Engineering and Technology JEET, Vol. 6, No. 1, pp. 133–138, 2011.
- [MER13] E. Merabet « Amélioration des Performances de Régulation d'une Machine Double Etoile par les Techniques de l'Intelligence Artificielle », Thèse de doctorat en science, université de Batna, 2013.
- [MIR05] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.
- [MON12] P. Monjean, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu ». Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [MOS03] R. Mosdale, « Transport électrique routier : Batteries pour véhicules électriques », Techniques de l'ingénieur, Génie électrique, 12 (D5565), D5565-1. 2003.
- [NEY88] H. Ney, « Equipement de Puissance », Edition Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [NRE18] Rapport de l'US department of energy « Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply », Disponible en ligne via : <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41869.pdf> , 2018.
- [OTM21] M. Otmane Rachedi, « Modélisation et Commande d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2021.
- [PAN99] V. Pant, G. K. Singh and S. N. Singh, « Modeling of a multi-phase induction machine under fault condition », IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99., pp. 92-97, Hong Kong, 1999.
- [PEN96] R. Pena, J. C. Clare et G. M. Asher, « A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 143, No 5, 1996.
-

-
- [PLA21] <http://www.planetoscope.com/eolienne/1060-production-mondiale-d-energie-eolienne.html> consulté le 11/12/2021
- [POI03] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [REK05] D. Rekioua, T. Rekioua et S. Alloune, « Switching Strategies in Direct Torque Control of Induction Machine: Modelling and simulation », International Conference Modelling and Simulation (MS'2004), Lyon, France, 4-7, pp. 313-321, 2004.
- [ROU15] R. Rouabhi, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, 2015.
- [SEY03] D. Seyoum, M. F. Rahman et C. Grantham, « Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control », Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'03), Eighteenth Annual IEEE, vol. 2, Miami Beach, 9-13, pp. 846-852, 2003.
- [SIN02] G.K. Singh, 'Multi-phase induction machine drive research – a survey', Electric Power Systems Research, 61(20), pp. 139–147, 2002
- [STA18] Sit web: <https://fr.statista.com/statistiques/828693/capacite-production-energie-eolienne-mondiale>, 2018
- [TAR08] S. Taraft « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université A/MIRA de Bejaïa, 2008.
- [TAM05] S. Tamazoult, « Etude comparative de l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation par un convertisseur statique AC/AC à commutation forcée et naturelle », Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2005.
- [WEN08] S. Wen, F. Wang, « Sensorless Direct Torque Control of High Speed PMSM Based on Variable Structure Sliding Mode ». Proceedings of Electrical Machines and Systems, ICEMS-IEEE, International Conference on, pp. 995 – 998. 2008.
- [WAN 12] Y. Wang, « Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2012.
-

- [WIN18] Site web : <https://windeurope.org/about-wind/reports/wind-energy-in-europe-scenarios-for-2030/> consulté le 12/09/2020.
- [XIA08] W. Xiaohong; Y. Jinming; Z. Xianyong; W. Jie, « Sliding Mode Control of Active and Reactive Power for Brushless Doubly-Fed Machine Computing, Communication, Control, and Management », CCCM '08, ISECS International Colloquium on, vol.2, no. 3-4, pp.294,298, 2008.

ANNEXE

1. Paramètres de la MASDE

Les paramètres de la MASDE à étoiles identiques sont donnés par le tableau 1 [CHE15, AMI12, MER11, BER04].

Tableau 1 : Paramètres de la MASDE à étoiles identiques

Puissance nominale	$P_n=4.5 \text{ kW}$
Tension nominale	$V_n=380 \text{ V}$
Vitesse nominale	$\Omega_m = 2940 \text{ tr/mn}$
Résistances d'une phase statorique (étoile 1 et 2)	$R_{s1} = R_{s2} = 3.72 \ \Omega$
Inductances de fuites d'une phase statorique (étoile 1 et 2)	$L_{s1} = L_{s2} = 0.022 \text{ H}$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = 2.12 \ \Omega$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.006 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$L_m = 0.3672 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.0625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$
Nombre de paires de pôles	$p=1$

Les paramètres de la MASDE à étoiles non identiques après calculs sont donnés par le tableau 2 :

Tableau 2 : Paramètres de la MASDE à étoiles non identiques

Puissance nominale	$P_n=4,5\text{kW} (3375\text{W}+1125\text{W})$
Tension nominale	$V_n=380 \text{ V}$
Vitesse nominale	$\Omega_r = 2940 \text{ tr/mn}$
Résistances d'une phase statorique de l'étoile 1	$R_{s1} = 2.48 \ \Omega$
Résistances d'une phase statorique de l'étoile 2	$R_{s2} = 7.44 \ \Omega$
Inductances de fuites d'une phase statorique de l'étoile 1	$L_{s1} = 0.0147 \text{ H}$
Inductances de fuites d'une phase statorique de l'étoile 2	$L_{s2} = 0.0440 \text{ H}$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = 2.12 \ \Omega$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.006 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$L_m = 0.3672 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.0625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$
Nombre de paires de pôles	$p=1$

2. Paramètres de la turbine

Les paramètres de la turbine éolienne sont donnés dans le tableau 3 [OTM21]

Tableau 3 : *Paramètres de la turbine éolienne*

Rayon de l'éolienne	$R=2$ m
Gain du multiplicateur de vitesse	$G=5.14$
Coefficient de puissance maximal	$C_{pmax} = 0.48$
Vitesse spécifique optimale	$\lambda_{opt} = 8.1$
Nombre de pales	3
Hauteur du mat	$H=15$ m
Moment d'inertie	$J_t = 0.2$ kg.m ²
Coefficient de frottement	$K_{ft} = 0.0024$ N.m.s/rd

3. Paramètres de bus continu et de la charge

Les paramètres du bus continu et de la charge sont donnés par le tableau 4 :

Tableau 4 : *Paramètres du bus continu et de la charge*

Tension du bus continu	$U_{dc} = 600$ V
Capacité du bus continu	$C = 0.0012$ μ F
Charge résistive	$R_{ch} = 134$ Ω

Résumé

Le développement des énergies renouvelables fait l'objet des recherches récentes dans le monde dans le but de freiner les sources de pollution atmosphérique d'une part et de trouver une alternative aux énergies fossiles d'autre part. La machine asynchrone à double étoile présente plusieurs avantages par rapport à la machine triphasé conventionnelle dont la fiabilité, la segmentation de puissance et la diminution des harmoniques d'espace et du temps. Le modèle que nous avons proposé et étudié dans cette thèse présente une nouvelle configuration d'un système éolien autonome à vitesse variable muni d'un stockage chimique basé sur la machine asynchrone à double étoile à paramètres non identiques ayant des fonctionnements différents. Le bobinage de commande charge la batterie de stockage en cas de vent suffisant et restitue l'énergie stockée pour alimenter le bobinage de commande. Cette énergie sera transmise par induction électromagnétique au bobinage principal afin de maintenir constante la puissance transmise à la charge en cas de vent faible. Les résultats sont satisfaisants et montrent bien la bonne régulation de puissance tout en offrant une continuité de fonctionnement.

Mots clé : système de conversion d'énergie éolienne autonome, MASDE, stators non identiques, contrôle du flux orienté, MPPT, système de stockage.

Abstract

The development of renewable energies is the subject of recent research in the world with the aim of curbing the sources of atmospheric pollution on the one hand and finding an alternative to fossil fuels on the other hand. The double star asynchronous machine has several advantages over the conventional three-phase machine including reliability, power segmentation and reduction of space and time harmonics. The model that we have proposed and studied in this thesis presents a new configuration of an autonomous variable speed wind system equipped with a chemical storage based on the double star asynchronous machine with non-identical parameters having different operations. The control winding charges the storage battery when there is sufficient wind and releases the stored energy to supply the control winding. This energy will be transmitted by electromagnetic induction to the main winding in order to keep the power transmitted to the load constant in the event of low wind. The results are satisfactory and show good power regulation while offering continuity of operation.

Keywords: stand-alone wind energy conversion system, MASDE, non-identical stars, field-oriented control, MPPT, storage system

الملخص

يعد تطوير الطاقات المتجددة موضوع بحث حديث في العالم بهدف الحد من مصادر تلوث الغلاف الجوي من جهة وإيجاد بديل للوقود الأحفوري من جهة أخرى. تتميز الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج بالعديد من المزايا مقارنة بالآلة التقليدية ثلاثية الطور بما في ذلك الموثوقية وتجزئة الطاقة وتقليل التوافقيات الزمنية والمكانية. يقدم النموذج الذي اقترحنه ودرسنه في هذه الأطروحة تكوينًا جديدًا لنظام الرياح المتغيرة السرعة المستقل والمجهز بمخزن كيميائي قائم على الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج مع معلمات غير متطابقة وعمليات مختلفة. تقوم لفائف التحكم بشحن بطارية التخزين عند وجود رياح كافية وتحرر الطاقة المخزنة لتشغيل لف التحكم. سيتم نقل هذه الطاقة عن طريق الحث الكهرومغناطيسي إلى الملف الرئيسي من أجل الحفاظ على الطاقة المنقولة إلى الحمل في حالة انخفاض الرياح. النتائج مرضية وتظهر تنظيمًا جيدًا للطاقة مع توفير استمرارية التشغيل.

الكلمات الأساسية: نظام تحويل طاقة الرياح، الآلة غير المتزامنة ذات النجمة المزدوجة، معلمات غير متطابقة، التحكم الشعاعي، نظام التخزين.