

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :/م/م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Réalisé par :

MALKI Ameer

Et

SAKOU Messaoud

Thème

Commande optimisée d'une cascade de deux machines asynchrone

Soutenu le:/..../2021

Devant la commission composée de :

Mr :	Prof.	Univ. Bouira	Président
Mr : MAAFA Amar	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
.....	M.C.B	Univ. Bouira	Examineur
.....	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire: 2020-2021

DEDICACES

Nous dédions ce modeste travail :

À nos parents qui nous ont donné le sens de la vie.

À nos chers frères et sœurs.

À toutes nos familles SAKOU et MALKI.

À tous nos chers amis.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont premièrement à Dieu “*ALLAH*” tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu’il nous a donné durant toutes ces années.

Nos remerciements sincèrement toute personne qui nous a aidée de près ou de loin pour évaluer ce travail et plus

Particulièrement nos encadreurs Mr. Amar MAAFA et Mr. AIT ABBAS Hamo pour leur confiance qu’ils nous ont accordée et pour l’intérêt qu’il ont constamment porté à noter travail

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens inconditionnels et toutes personnes ayant contribué pour la réalisation de ce projet

Table des matières

Notations	v
Liste des symboles	viii
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les machines électriques existantes	
I.1 Introduction	3
I.2 Classifications des machines électriques	3
I.2.1 Machines à courant continu	4
I.2.1.1 Constitution d'un moteur à courant continu.....	4
I.2.1.2 Modes d'excitation (MAC).....	5
I.3 Machines a courant alternatif	7
I.3.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil.....	7
I.3.2 Machines asynchrone a rotor bobiné.....	7
I.3.3 Machines asynchrones en cascade.....	9
I.3.4 machine synchrone.....	12
I.3.4.1 Machines synchrones à excitation électrique.....	12
I.3.4.2 Machine synchrone double excitation (MSDE).....	14
I.3.4.3 Machines synchrones à aimants permanents.....	14
I.3.5 Machines à reluctance variable.....	15
I.4. Conclusion.....	17
Chapitre II : Modélisation mathématique de la chaine de conversion	
II.1 Introduction	18
II.2 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné	18
II.2.1 Description de la MAS.....	18

II.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	19
II.2.3 Modèle de la MAS à rotor bobiné dans le repère (abc).....	19
II.2.4 Transformation de PARK.....	21
II.2.5 Représentation d'état de la MAS à rotor bobiné.....	23
II.2.6 Expression du couple de la MAS à rotor bobiné.....	24
II.3 Modélisation de la machine asynchrone en cascade	26
II.3.1 Machines asynchrones en cascade	26
II.3.2 Modèle de la cascade.....	26
II.4 Simulation et interprétation des résultats.....	29
II.5 Modélisation du convertisseur MLI.....	31
II.6 Commande de redresseur par la technique MLI triangulo-sinusoidale.....	33
II.7 Modélisation de la turbine.....	33
II.7.1 Modèle du multiplicateur.....	35
II.7.2 Modèle de l'arbre.....	35
II.7.3 Résultat de simulation.....	36
II.8 Conclusion.....	36

III Commande de la MASEC par réseaux de neurones (RNA)

III.1 Introduction	37
III.2 Description du système étudié	37
III.3 Contrôle de puissance de la MASEC	38
III.3.1 Fonctionnement de la MASEC dans les quatre quadrants.....	38
III.3.2 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1	39
III.3.3 Relation entre la tension du deuxième stator et son courant	41

III.3.4 Relation entre la puissance du premier stator et le courant deuxième stator..	42
III.4 Commande vectorielle direct de la MASEC.....	43
III.4.1 Synthèse du régulateur PI	43
III.4.2 Résultats de simulation	45
III.5 Commande intelligente de la MASEC.....	48
III.5.1 Introduction.....	48
III.5.2 Réseaux de neurones	48
III.5.2.1 Neurone biologique	49
III.5.2.3 Modèle d'un neurone artificiel.....	50
III.5.2.4 Fonction d'activation.....	51
III.5.2.5 Composition d'un réseau de neurones.....	52
III.5.2.6 Type de réseau de Neurones.....	53
III.5.2.7 Apprentissage d'un réseau de neurones.....	54
III.5.2.8 Algorithmes d'apprentissage du perceptron multicouche.....	55
III.5.2.9 Avantages et Inconvénients des réseaux de neurones.....	56
III.5.2.10 Mise en œuvre des réseaux de neurones.....	56
III.5.2.11 Choix des entrées/sorties du réseau de neurones.....	56
III.5.2.12 Choix du type de réseau de neurones.....	57
III.5.2.13 Choix de la stratégie d'apprentissage.....	57
III.5.2.14 Commande par réseaux de neurones avec régulateurs PI.....	59
III.5.2.15 Résultats de simulation et interprétation.....	60
III.6 Conclusion.....	64
Conclusion générale	65

Table des matières

1.1 Annexes	I
1.1 Bibliographie	II

Notations

MADA	Machine Asynchrone Doublement Alimentée
MAS	Machine Asynchrone
MCC	Machine à Courant Continu
MASEC	Machine Asynchrone en Cascade
MASDPS	Machine Asynchrone à Double Paquet Statorique
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
MRV	Machine à Reluctance Variable
MRVDS	Machine à réluctance variable à double saillance
MSDE	Machine synchrone double excitation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
DC	Direct Current (courant continu)
AC	Alternating Current (courant alternatif)
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
PI	Proportionnel Intégrateur
RNA	Réseaux de neurones

Liste des symboles

A	Matrice des résistances de la cascade (Ω)
B	Matrice des inductances propres cycliques de la cascade (H)
C_r	Couple résistant (N.m)
C_e	Couple électromagnétique de la cascade (N.m)
$C_{e1,2}$	Couples électromagnétiques des deux machines (N.m)
C_p	Coefficient de puissance de la turbine
$f_{1,2}$	Coefficient de frottement des deux machines (N.m.s/rd)
f	Coefficient de frottement total (N.m.s/rd)
f_p	Fréquence de porteuse (Hz)
f_r	Fréquence de référence (Hz)
G	Gain du multiplicateur
$i_{a,b,c s,1,2}$	Courants triphasés statoriques (stator 01, stator 02) (A)
$i_{a,b,c r,1,2}$	Courants triphasés rotoriques (rotor 01, rotor 02) (A)
$i_{ds1,ds2}$	Courants des stators 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (A)
$i_{qs1,qs2}$	Courants des stators 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (A)
$i_{dr1,dr2}$	Courants des rotors 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (A)
$i_{qr1,qr2}$	Courants des rotors 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (A)
$[I_s], [I_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A)
J	Moment inertie total (kg. m^2)
$J_{1,2}$	Moment inertie des deux machines (kg. m^2)
J_t	Moment inertie de la turbine (kg. m^2)
k_p	Gain proportionnel du régulateur
k_i	Gain intégrale du régulateur
$L_{s1,2}$	Inductances propres cycliques du stator 01 et 02 (H)
$L_{r1,2}$	Inductances propres cycliques du rotor 01 et 02 (H)
L_m	Inductance mutuelle cyclique du stator par rapport rotor (H)
$[L]$	Matrice des inductances de la cascade (H)
$[L_{ss}]$	Matrice des inductances statoriques de la cascade (H)

$[L_{rr}]$	Matrice des inductances rotoriques de la cascade (H)
$[M_{sr}]$	Matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor (H)
P_{vent}	Puissance du vent ou puissance éolienne (W)
P_{aero}	Puissance aérodynamique (W)
$P_{s1,2}$	Puissances électriques actives du stator 01 et 02 (W)
P_g	Puissance électrique active échangée entre la machine et le réseau (W)
p	Nombre de paires de pôles de la machine asynchrone
p_1	Nombre de paires de pôles de la première machine
p_2	Nombre de paires de pôles de la deuxième machine
P	Opérateur de laplace
$[P(\theta_s)]$	Matrice de Park
$Q_{s1,2}$	Puissances électriques réactives du stator 01 et 02 (VAr)
Q_{gs2}	Puissance électrique réactive échangée entre le convertisseur et le réseau (W)
Q_g	Puissances électriques réactives du réseau (VAr)
$R_{a,b,c s1}$	Résistances des phases statoriques (stator 01) (Ω)
$R_{a,b,c s2}$	Résistances des phases statoriques (stator 02) (Ω)
$R_{a,b,c r1}$	Résistances des phases rotoriques (rotor 01) (Ω)
$R_{a,b,c r2}$	Résistances des phases rotoriques (rotor 02) (Ω)
R	Rayon de la pale (m)
s	Glissement de la cascade
s_1	Glissement de la première machine
s_2	Glissement de la deuxième machine
S	Surface circulaire balayée par la turbine (m^2)
$[T]$	Matrice de passage continu-alternative
t	Temps (s)
v_{vent}	Vitesse du vent (m/s)
$v_{a,b,c s1,2}$	Tensions triphasées statoriques (stator 01, stator2) (V)
$v_{a,b,c r1,2}$	Tensions triphasées rotoriques(rotor 01, rotor2) (V)
$v_{ds1,ds2}$	Tensions des stators 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (V)
$v_{qs1,qs2}$	Tensions des stators 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (V)
$v_{dr1,dr2}$	Tensions des rotors 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (V)
$v_{qr1, qr2}$	Tensions des rotors 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (V)

$[v_s], [v_r]$	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques (V)
β	Angle de l'orientation de la pale ($^\circ$)
$\varphi_{a,b,c s1}$	Flux triphasés statoriques (stator 01) (Web)
$\varphi_{a,b,c s2}$	Flux triphasés statoriques (stator 02) (Web)
$\varphi_{a,b,c r1}$	Flux triphasés rotoriques (rotor 01) (Web)
$\varphi_{a,b,c r2}$	Flux triphasés rotoriques (rotor 02) (Web)
$[v_{s,r}]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques (Web)
$\varphi_{ds1,ds2}$	Flux des stators 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Web)
$\varphi_{qs1,qs2}$	Flux des stators 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Web)
$\varphi_{dr1,dr2}$	Flux du rotor 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Web)
$\varphi_{qr1,qr2}$	Flux du rotor 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Web)
φ_{dr}	Flux rotorique selon l'axe d (Web)
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s)
Ω_s	Vitesse du synchronisme (rad/s)
Ω	Vitesse mécanique de rotation du rotor (rad/s)
$\omega_{s1,2}$	Pulsation des grandeurs électriques des stators 01 et 02 (rad/s)
ω_s	Pulsation des grandeurs électriques statoriques (rad/s)
$\omega_{r1,2}$	Vitesses électriques de rotation des rotors 01 et 02 (rd/s)
$\omega_{g1,2}$	Pulsation des grandeurs des rotors 01 et 02 (rad/s)
θ_s	Angles d'un axe lié au champ tournant par rapport au repère du stator (rad)
θ_r	Position du stator 01 par rapport au rotor (rad)
λ	Rapport de vitesse
ρ	Densité de l'air (kg/m^2)
τ_r	Constante de temps rotorique (s)
τ	Constante de temps d'un système du premier ordre (s)
$\Delta d, \Delta q$	Vecteurs cibles du RNA.
n	Sortie de l'intégrateur du RNA.
W	Vecteur des poids du neurone
R	Vecteur des entrées du neurone.
a	Sortie du neurone
N_0	Valeur initiale du vecteur poids de la couche cachée.
M_0	Valeur initiale du vecteur poids de la couche de sortie.

Listes des figures

Fig I.1	les deux fonctionnements de MCC.....	4
Fig I.2	Machine à courant continu.....	5
Fig I.3	Rotor à cage d'écureuil, la cage vide de fer à gauche et emplie.....	7
Fig I.4	Moteur asynchrone à rotor à bagues.....	8
Fig I.5	Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobinée	9
Fig I.6	Machines asynchrones en cascade.....	9
Fig I.7	Couplage mécanique frontal.....	10
Fig I.8	Couplage mécanique par succession.....	11
Fig I.9	Connexion électrique directe.....	11
Fig I.10	Couplage électrique inverse.....	12
Fig I.11	Inducteur d'une MS à pôles lisses.....	13
Fig I.12	Rotor d'une Machine Synchrone à pôle saillant.....	13
Fig I.13	Machine synchrone double excitation série	14
Fig I.14	Exemple de structures des aimants au rotor de la MSAP.....	15
Fig I.15	Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance.....	16
Fig II.1	Représentation schématique des enroulements de la MAS `a rotor bobiné.....	19
Fig II.2	Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone.....	22
Fig II.3	(1) Passage d'une base triphasée (abc) à une base diphasée ($\alpha\beta$) ; (2) Rotation du système ($\alpha\beta$) vers le système (dq)	22
Fig II.4	Machine asynchrone en cascade.....	26
Fig II.5	la vitesse da la MASEC	30
Fig II.6	couples électromagnétique.....	30
Fig II.7	puissance active et réactive	30
Fig II.8	courant et tension du premier stator	30
Fig II.9	courant de stator 1.....	31
Fig II.10	courant de stator 2.....	31
Fig II.11	Schématisation de l'ensemble convertisseur-MAS.....	33
Fig II.12	Schéma bloc de la technique triangulo-sinusoidale sous Simulink.....	33
Fig II.13	Exemple de chronogramme d'une commande «sinus-triangle»	33
Fig II.14	Le Coefficient de puissance (C_p) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine(λ)	31

Fig II.15	Schéma bloc de la turbine	36
Fig II.16	Vitesse de rotation de la turbine	36
Fig II.17	puissance mécanique de la turbine.....	36
Fig III.1	Schéma du système étudié.....	37
Fig III.2	Les différents modes de fonctionnement de la MASEC.....	39
Fig III.3	Schéma-bloc du système à réguler premier stator	42
Fig III.4	Schéma-bloc de la commande vectorielle en puissance.....	43
Fig III.5	Représentation schématique de la boucle de régulation de la puissance du premier stator	44
Fig III.6	La vitesse de rotation de MASEC	46
Fig III.7	Le puissance active de stator 1 et stator 2	46
Fig III.8	puissance réactive de stator 1	46
Fig III.9	puissance active après l'application des contraintes	47
Fig III.10	puissance réactive après l'application des contraintes	48
Fig III.11	Modèle du neurone biologique.....	49
Fig III.12	Modèle d'un neurone artificiel	50
Fig III.13	Représentation matricielle d'un neurone artificiel	51
Fig III.14	Composition d'un réseau de neurones.....	53
Fig III.15	Un réseau de neurone non bouclé.....	54
Fig III.16	Apprentissage supervisé	54
Fig III.17	Apprentissage non supervisé.....	55
Fig III.18	Modèle du réseau de neurones utilisé.	58
Fig III.19	Fenêtre d'entraînement de réseau de neurones.....	58
Fig III.20	Régression entre les sorties et les cibles (Targets).....	59
Fig III.21	Schéma du système de la commande neuronal.....	60
Fig III.22	vitesse de rotation de MASEC 9	60
Fig III.23	puissance active 1 ^{er} essai (RNA PI)	61
Fig III.24	puissance active 1 ^{er} essai (PI).....	61
Fig III.25	puissance réactive 1 ^{er} essai (RNA PI).....	61
Fig III.26	puissance réactive 1 ^{er} essai (PI)	61
Fig III.27	puissance active 2 ^{ém} essai (RNA PI).....	62

Fig III.28	puissance actif 2 ^{ém} essai (PI)	62
Fig III.29	puissance réactif 2 ^{ém} essai (RNA PI)	62
Fig III.30	puissance réactif 2 ^{ém} essai (PI)	62
Fig III.31	Schéma du système avec la dynamique.....	62
Fig III.32	Vitesse de rotation de la turbine.....	63
Fig III.33	puissance mécanique de la turbine	63
Fig III.34	puissance actif 1 ^{er} essai	63
Fig III.35	puissance réactif 1 ^{er} essai.....	63
Fig III.36	puissance actif 2 ^{ém} essai	64
Fig III.37	puissance actif 2 ^{ém} essai.....	64

Liste des tableaux

I.1	des organes MAC (magnétique/électrique/mécanique).....	5
I.2	mode d'excitation MAC.....	6
III.1	Les différentes fonctions d'activation utilisées dans les RNA.....	52
I	Paramètres de la MASEC	I
II	Paramètres de la turbine utilisée.....	I

Introduction générale

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air. C'est l'énergie récupérable par une éolienne qui est proportionnelle à la surface balayée par son rotor et au cube de la vitesse du vent. [1].

Un aérogénérateur, couramment appelé éolienne, est un appareil qui convertit une partie de l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre d'entraînement, puis la convertir en énergie électrique grâce à un générateur.

On peut utiliser les générateur synchrone(GSAP) pour les petites puissances ($20\text{KW} <$), Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone (machine asynchrone (MAS), Machine asynchrone à cage d'écurueil (MASCE), Machine asynchrone à rotor bobiné (MARB), Machines asynchrones doublement alimentées (MADA) sont plus courant et nettement plus économiques.[2]

Notre étude basé sur le contrôle d'un deux machine asynchrone en cascade (MASEC) avec une commande intelligent (réseaux de neurone artificielle) pour utiliser cette machine comme un aérogénérateur

Ce mémoire est structuré en trois chapitres

Le premier chapitre comporte des généralités sur les machines électriques, nous avons classé les machines conventionnelle selon le type de courant (alternative ou contenue).

Le deuxième chapitre abordera la modélisation de la chaîne de conversion (la turbine, la MADA, la MASEC Nous avons ainsi présenté le modèle de la MASEC dans le repère naturel triphasé (a,b,c), puis dans le repère biphasé (d,q) en utilisant la transformation de Park et puis la modélisation de l'onduleur (MLI) et la simulation de la MASEC sous MATLAB-Simulink , finalement l'interprétation des résultats obtenue par la simulation.

Le troisième chapitre sera consacré premièrement au contrôle de puissance de la cascade en utilisant des régulateurs PI

Des simulations du système global sous MATLAB/SIMULINK sans et avec contraintes ont été effectuées, les dernières ayant permis de tester la robustesse de cette commande vis-à-vis des contraintes appliquées.

Le second partie basé sur une contrôle intelligent (réseau de neurone artificielle) pour améliorer la commande conventionnelle, on va voire un généralité sur les réseaux de neurone artificielle puis l'application de cette technique pour contrôlé la MASEC, nous avons faire des simulations de ces deux cas distincts sont réalisées avec et sans contraintes, montrant ainsi l'influence de la commande sur la machine. Enfin un comparaison entre les deux commande

Finalemnt une conclusion générale qui résume l'étude effectué dans ce mémoire et les résultats obtenus

Chapitre I : Classification des machines électriques

I.1. Introduction

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois **Ørsted**, le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique. Et la campagne d'inventions et le développement des machines électriques se sont poursuivis jusqu'à présent ; où l'on trouve maintenant à notre époque de nombreuses machines électriques fonctionnant sur deux types de courants électriques

-courant alternatif AC

-Courant continu DC

Dans ce chapitre on va faire une classification des machines électrique selon leurs alimentations, à savoir alternatives ou continues.

I.2. Classifications des machines électriques

Le principal objectif des machines électriques est la conversion l'énergie d'une forme à une autre, avec une de ces formes étant électrique et l'autre étant mécanique ou électrique.

I.2.1 Machine à courant continu

La machine à courant continu et un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique [3]

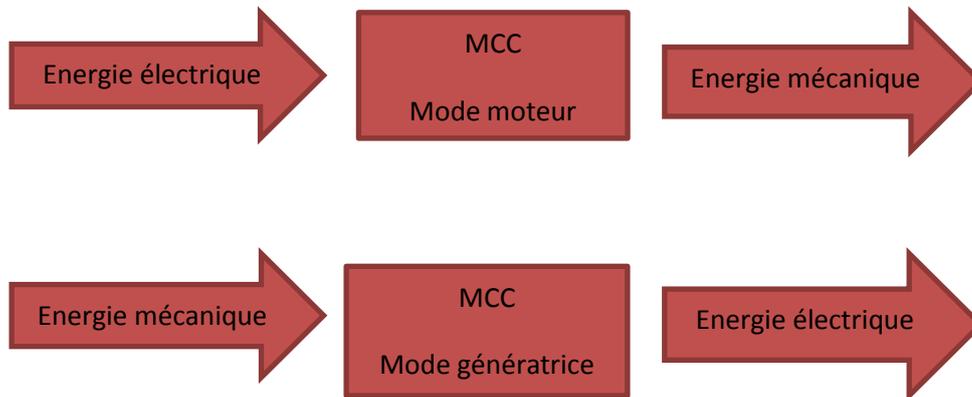


Figure (I.1) : les deux fonctionnements de MCC

I.2.1.1. Constitution d'un moteur à courant continu

La machine à courant continu comporte les parties principales suivantes :[4]

- Une partie fixe appelée STATOR qui aura le rôle d'inducteur.
- Une partie mobile appelée ROTOR qui aura le rôle d'induit.
- Une liaison rotor - éléments extérieurs à la machine appelée balais-collecteur

A) L'inducteur (stator)

Il est forme soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le Circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie Mobile, où se situent les conducteurs. Ce flux et ce champ sont orientés du pôle Nord vers le pôle Sud

B) L'induit (rotor)

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

C) collecteur / Balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur.

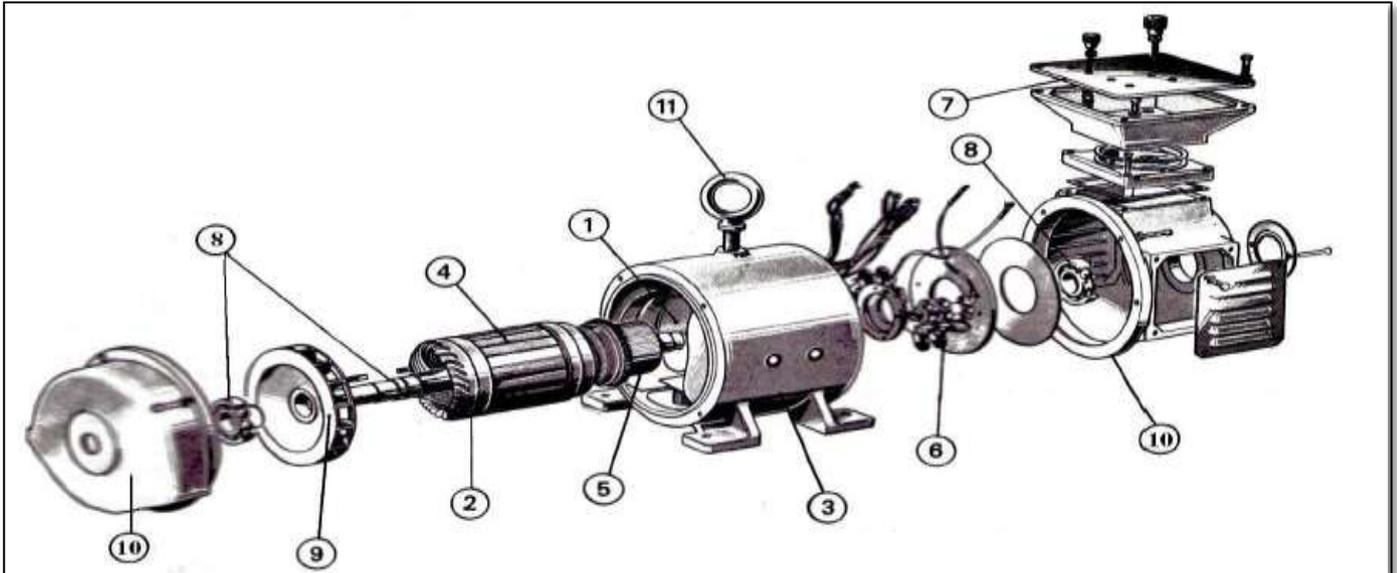


Figure (I.2) : Machine à courant continu

Organes magnétique	Organes électrique	Organes mécanique
(1) les pôles inducteurs	(4) les faisceaux de conducteur	(3) le stator ou la carcasse avec pattes de fixation
(2) l'induit	(5) le collecteur	(8) l'arbre et les roulements
(3) la culasse	(6) les balais	(9) la turbine de ventilation
	(7) la plaque à bornes	(10) les flasques paliers coté arbre et cote collecteur
		(11) l'anneau de manutention

Tableau (I.1) : des organes (magnétique/électrique/mécanique)

I.2.1.2. Modes d'excitation [5]

- **Excitation série** : Le bobinage inducteur est connecté en série avec le bobinage induit,
- **Excitation parallèle** : Les bobinages, induit et inducteur, sont connectés en parallèle.
- **Excitation séparée** : Les bobinages, induit et inducteur, sont alimentés par deux sources de tensions différentes.
- **Excitation composée** : Cette technologie permet de réunir les qualités du moteur à excitation série et du moteur à excitation parallèle. Ce moteur comporte deux enroulements par pôle

inducteur. L'un est en parallèle avec l'induit. Il est parcouru par un faible courant au regard du courant de travail. L'autre est en série.

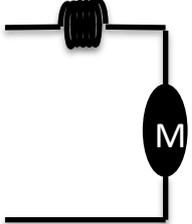
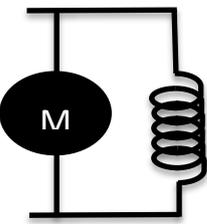
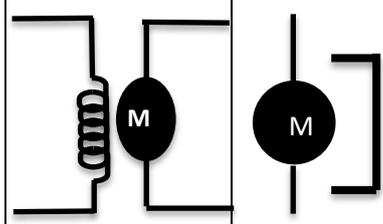
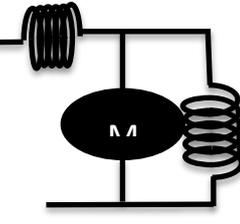
M. d'excitation	Excitation série	Excitation parallèle	Excitation séparée	Excitation composée
Schéma				
Caractéristiques	Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse	Vitesse constante quel que soit la charge	L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande et large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement	Entraînements de grande inertie, couple très variable avec la vitesse.
Domaines d'emploi	engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction	machines-outils, appareil de levage (ascenseur)	machines-outils : moteur de broche, d'axe. Machines spéciales.	petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie.

Tableau (I.1) : mode d'excitation

I.3. Machine a courant alternatif

I.3.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil

La plupart des moteurs sont en cage. Le rotor est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [6]

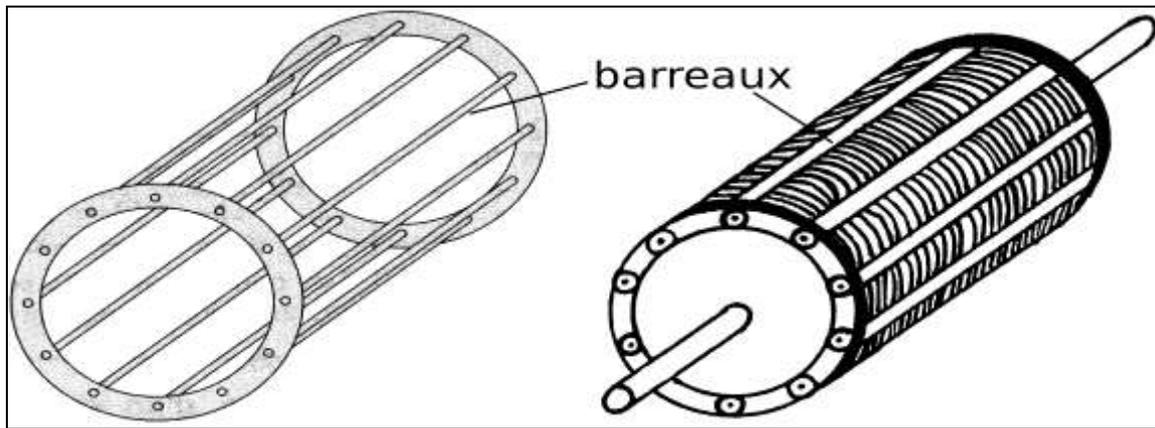


Figure (I.3) : Rotor à cage d'écureuil, la cage vide de fer à gauche et remplie de rondelles de fer à droite.

I.3.2 Machines asynchrones a rotor bobiné [7]

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [1].

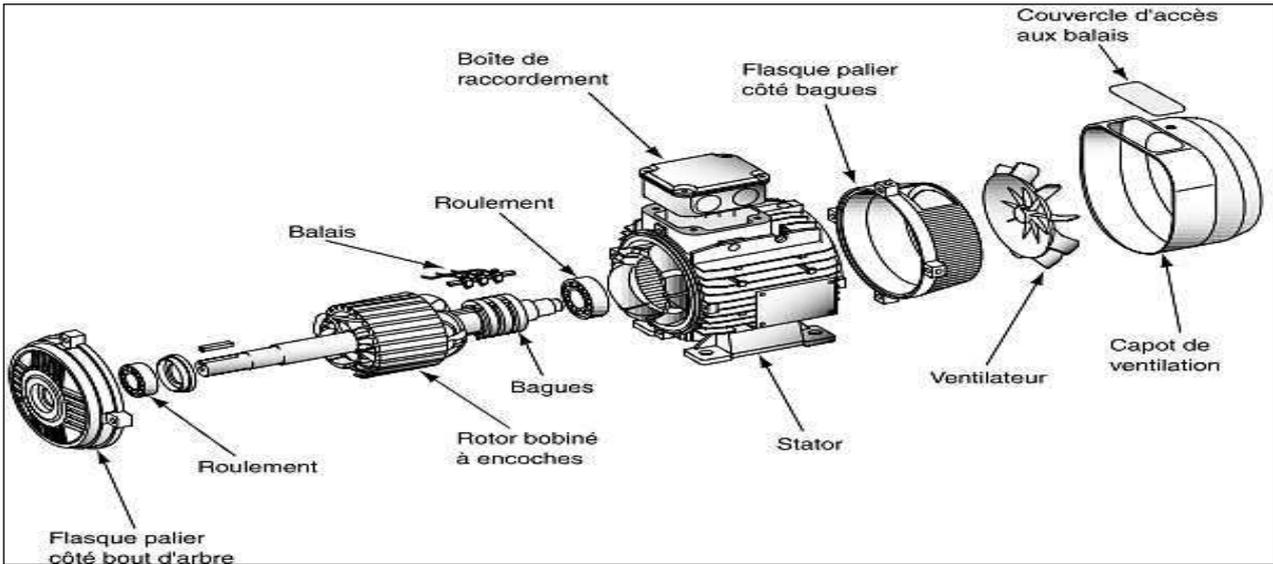


Figure (I.4) : Moteur asynchrone à rotor à bagues

Actuellement la machine asynchrone double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [8].

Telles que:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc ...

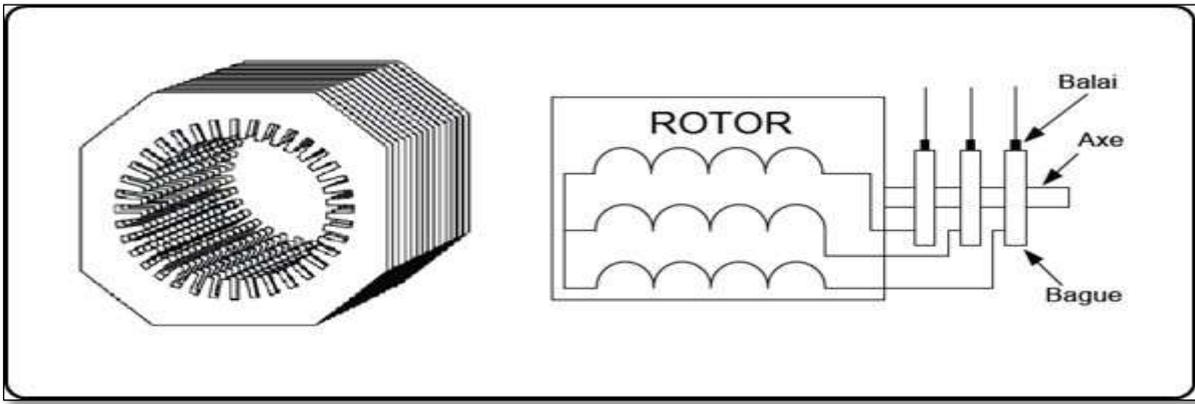


Figure (I.5) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné.

I.3.3 Machines asynchrones en cascade

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascade d Doubly Fed Induction Machine). La figure (I.6) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [9].

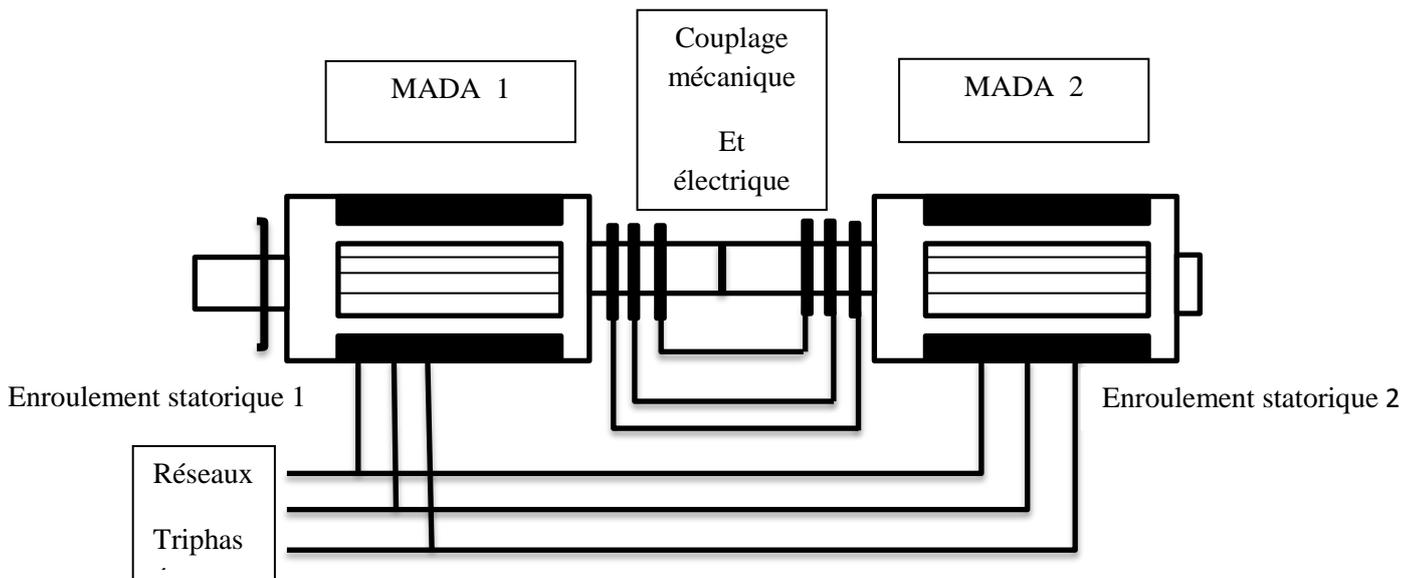


Figure (I.6) : Machines asynchrones en cascade

Types de couplages

Le couplage peut se faire de plusieurs manières, à savoir un couplage mécanique avec ou sans couplage électrique.

A .Couplage mécanique

Il existe généralement deux types d'accouplements, couplage frontal et le couplage par succession. Ce couplage est relais afin d'avoir un couple total de la cascade équivalent à la somme

des couples des deux machines. Cette situation est très pratique car nous pouvons en connectant, les deux machines, avoir la puissance totale requise par les deux machines, c'est-à-dire la puissance totale sera égale à la somme de la puissance des deux machines.

- Couplage frontal

Les deux machines sont mises face à face, tel qu'il est représenté sur la figure (I.7). Notons que pour ce genre de connexion le couplage des enroulements rotoriques peut se faire de deux manières, soit en couplage direct où on respecte la succession des phases ou alors en couplage inverse où deux des phases sont interchangées, ce changement est schématisé par un interrupteur à deux positions [10].

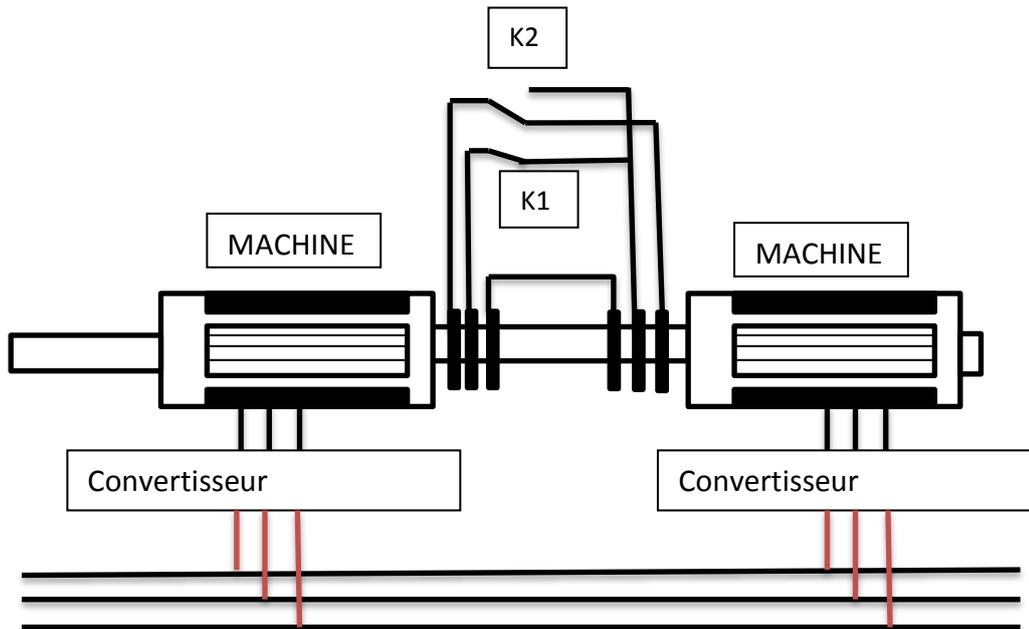


Figure (I.7) : Couplage mécanique frontal [17]

- Couplage par succession

Un couplage par succession, veut dire que les deux machines se succèdent l'une après l'autre, tel qu'il est représenté sur la figure (I.8). Là aussi l'inversion de phases est possible

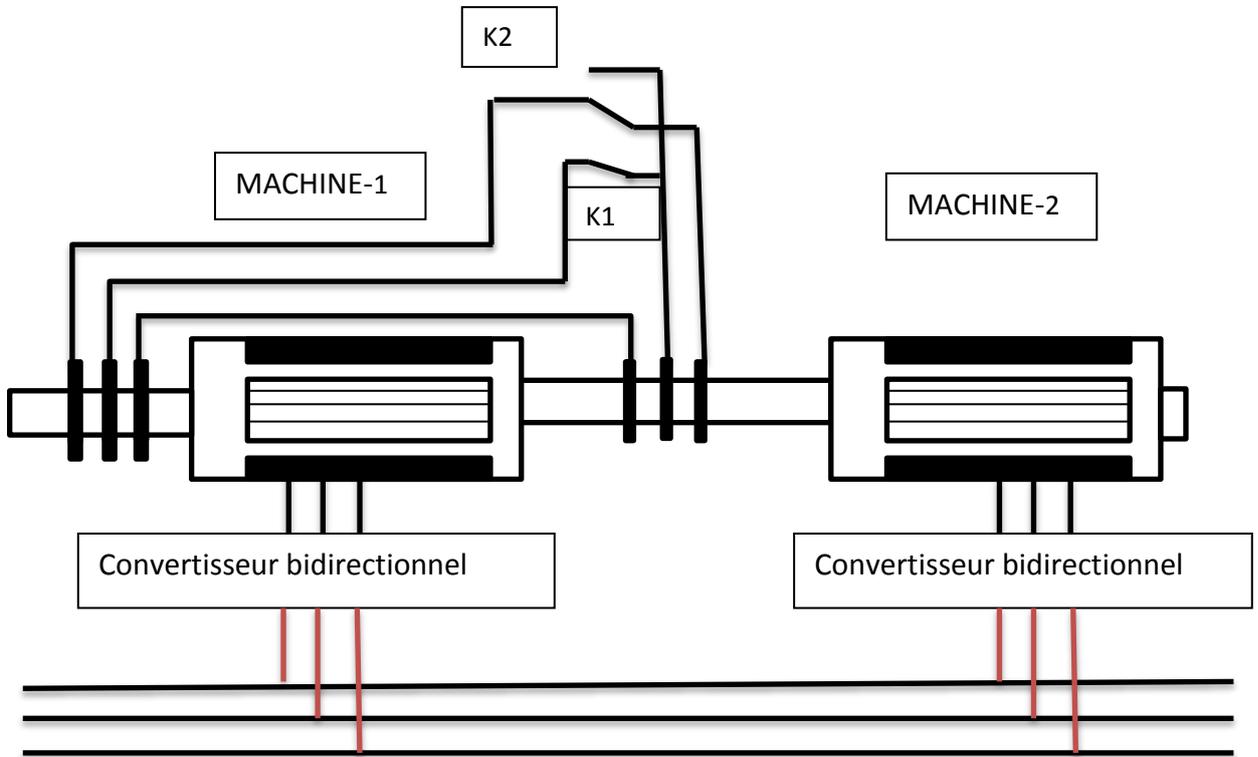


Figure (I.8) : Couplage mécanique par succession [10].

B) Couplage électrique

- **Couplage direct**

Il consiste à raccorder l'entrées des bobines rotoriques d'une machine à la sorties des bobines rotoriques de l'autre machine. La figure (I.9) montre ce couplage [11].

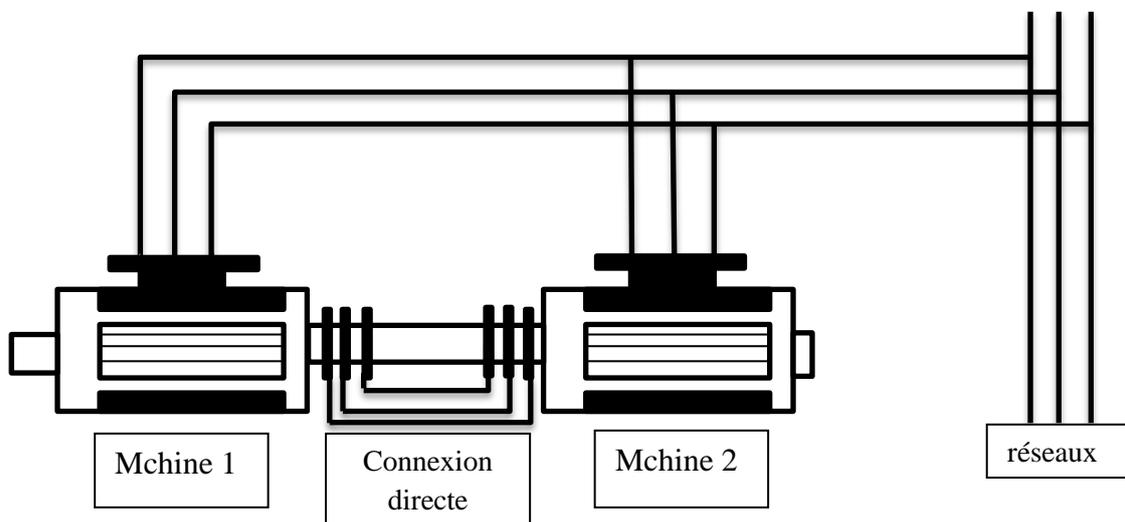


Figure (I.9) : Connexion électrique directe [11].

- Couplage inverse

Le couplage des bobines des rotors, de deux machines, se fera en permutant deux phases Rotoriques [11]. Ce branchement inverse est illustre sur la figure (I.10).

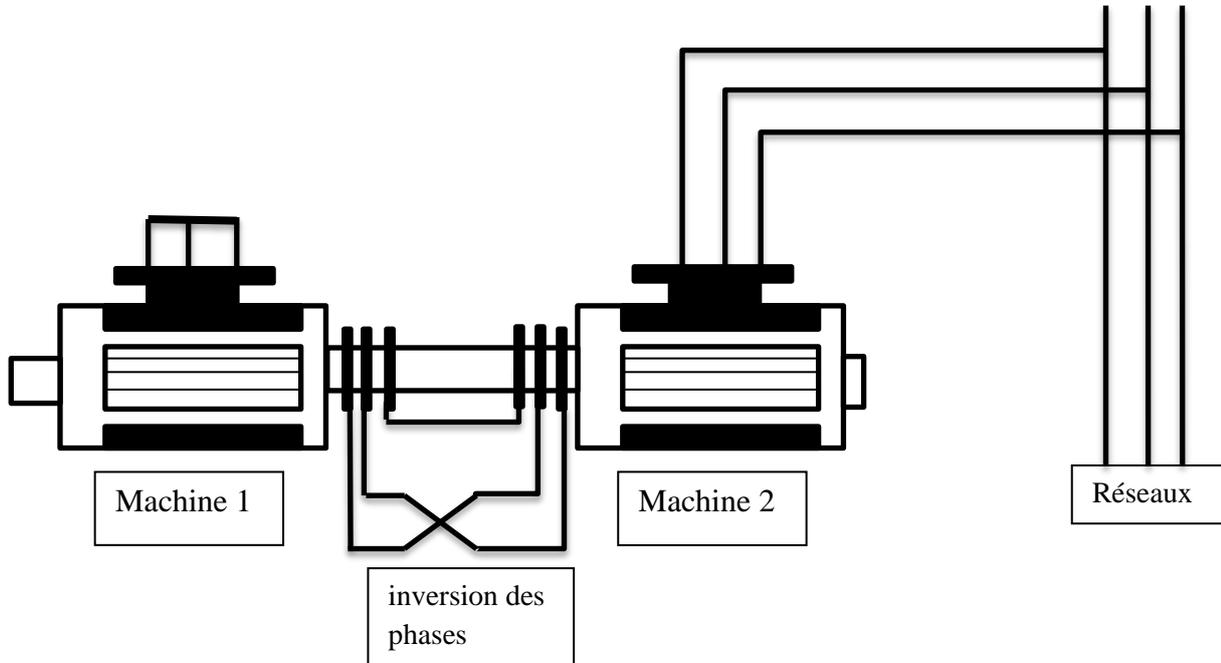


Figure (I.10) : Couplage électrique inverse [11]

I.3.4. machine synchrone

I.3.4.1 Machines synchrones à excitation électrique

Les machines électriques synchrones qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou système d'excitation. En outre, l'existence de ce dispositif permet, suivant les cas, de régler la tension ou la puissance réactive de la machine synchrone. Les performances obtenues doivent être en accord avec les conditions d'exploitation de la machine, en particulier les protections de la machine synchrone elle-même et, éventuellement, celles du réseau électrique auquel elle est reliée.[12]

Elle constituée par rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatif. L'obtention d'une valeur de couple moyen non nulle passe alors par la vérification de la condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre vitesse du champ tournant du stator et la vitesse du champ tournant rotor. Concernant le rotor, deux configurations sont envisageables

A .Machines à pôles lisses

Ces machines ont un entrefer constant, l'enroulement d'excitation étant placé dans des rainures longitudinales usinées sur un cylindre d'acier massif, à sa sortie de fonderie. [11]

On retrouve ce type de machine est dans les applications de fortes puissances et grande vitesse

Le rotor à pôles lisses est utilisé dans les machines synchrones bipolaires ou tétra polaires qui fonctionnent aux vitesses de 3000 ou 1500 tours par minute. Le rotor à pôles saillant ne convient pas pour de telles machines à cause des difficultés que présente la fixation des enroulements d'excitation concentrés en cas du petit nombre de pôles (surtout dans les machines bipolaires) ; c'est pourquoi les machines bipolaires et tétra polaires utilisent exclusivement des rotors lisses bien que les rotors à pôles saillants reviennent moins chers [12].

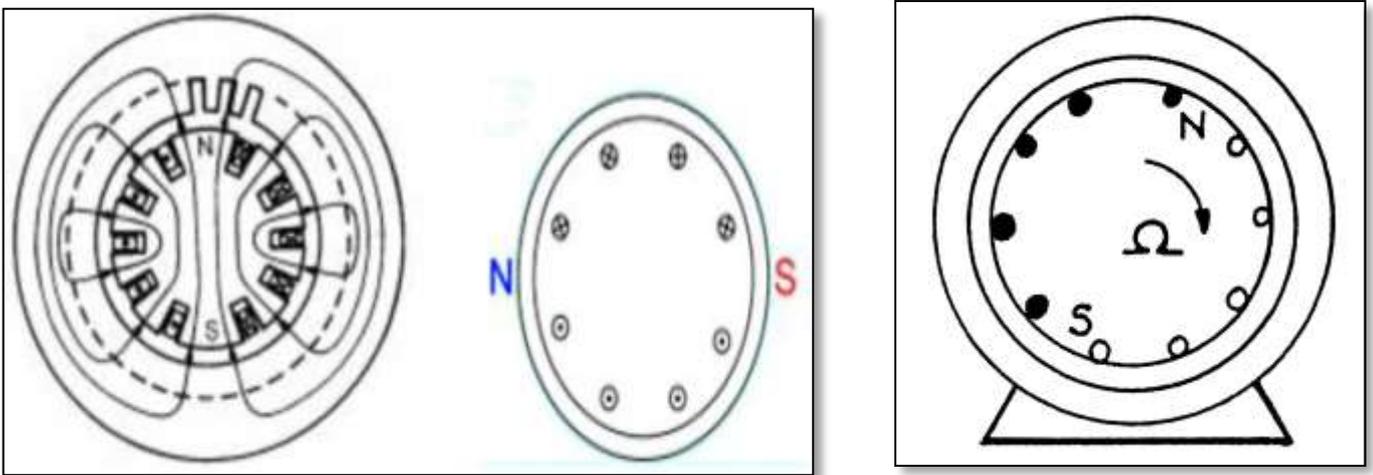


Figure (I.11) : Inducteur d'une MS à pôles lisses

B. Machines à pôles Saillants

Elles utilisent des pièces polaires rapportées sur une culasse, avec des enroulements d'excitation constitués par des bobines. [13]

L'ensemble du circuit magnétique est alors identique à celui d'une machine à courant continu, avec la seule différence qu'il est tournant au lieu d'être fixe. Comme pour celle-ci, le rotor un alternateur comporte n nombre de paires poteau, que l'on distingué sur la figure suivante.

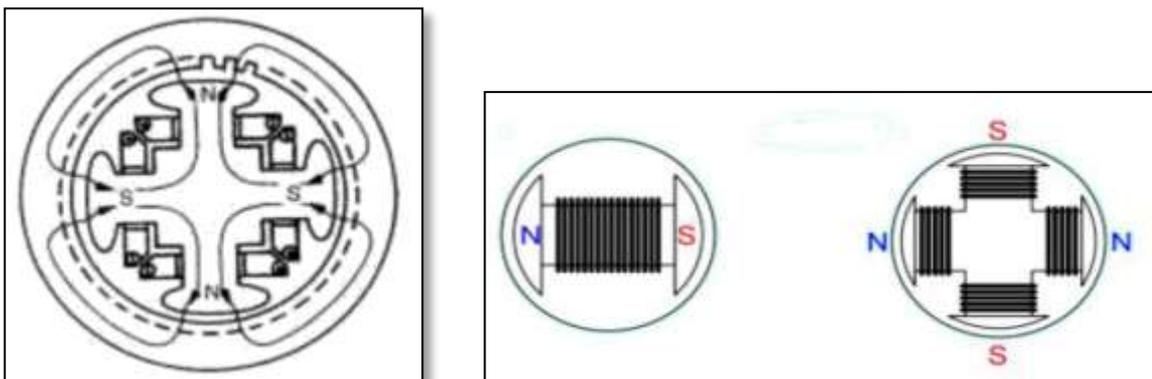


Figure (I.12) : Rotor d'une Machine Synchrone à pôle saillant

I.3.4.2. Machine synchrone double excitation (MSDE)

Le terme « double » renvoie au fait que dans ces machines, le flux d'excitation est produit par deux types de sources magnétiques [14] :

- Une partie du flux d'excitation est créée grâce à des aimants permanents ;
- L'autre partie par une ou des bobines d'excitation

Ces machines, permettent dans une certaine mesure d'allier les avantages des machines à aimants permanents (rendement élevé) à ceux des machines à excitation bobinée (souplesse de commande par le contrôle du flux d'excitation). La présence de l'excitation bobinée permet, soit de réduire le flux d'excitation, soit de le renforcer, il s'ensuit que le « défluxage » de ces structures est plus aisé que celui des machines à aimants permanents. Le fonctionnement en variation de vitesse devient de ce fait moins délicat [14].

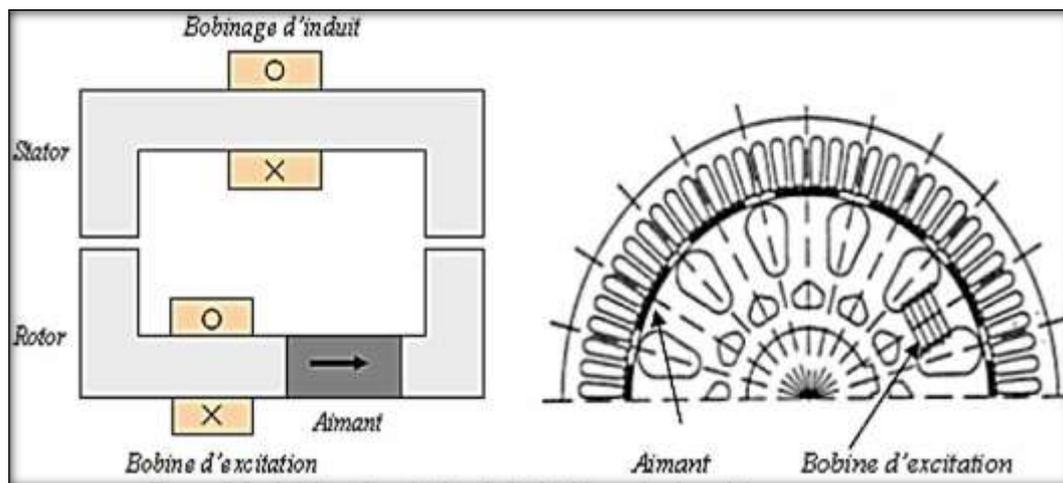


Figure (I.13) : Machine synchrone double excitation série

I.3.4.3. Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible. Elle peut fonctionner en mode moteur tout comme en mode générateur. Sa particularité par rapport aux autres machines conventionnelles, réside au niveau du champ magnétique produit par les aimants permanents au rotor. Mais son bobinage statorique reste identique à celui des autres machines.

Comme tout actionneur électrique, la machine synchrone à aimants permanents est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le stator renferme un bobinage alimenté en triphasé, et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation. Quant au rotor, son champ magnétique produit est généré par des aimants permanents. Le stator de

structure ordinairement lisse, porte des encoches à l'intérieur desquels sont disposés des enroulements de phases. En mode générateur la machine fournit de l'énergie au réseau, tandis qu'en mode moteur elle en consomme plutôt. Le rotor est généralement à pôles lisses ou à pôles saillants [15]

Disposition des aimants dans le rotor

Dans les machines synchrones à aimants permanents, le rotor a une conception spécifique et trois structures se présentent selon la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques. Ces possibilités de disposer des aimants dans le rotor permettent de créer un champ magnétique rotorique dans l'entrefer. Du point de vue de son rotor à pôles lisses ou à pôles saillants, la machine synchrone à aimants permanents possède des configurations différentes. Cette dissemblance provient du fait que les aimants permanents peuvent être montés en surface ou insérés au rotor. Autrement dit, ils peuvent être enterrés dans le rotor. Dans ces conditions, trois grandes structures se présentent [16] :

- Les machines à aimants permanents collés en surface à pôles lisses (figure I.14(a)), dont la particularité est de détenir un grand entrefer et les aimants sont disposés sur la périphérie du rotor. L'inductance d'axe direct est égale à l'inductance d'axe en quadrature dans cette posture.
- Les machines synchrones dont les aimants sont insérés en surface du rotor (figure I.14(b)), sont caractérisées par une très grande saillance qui permet l'augmentation du couple maximal. L'inductance d'axe direct est inférieure à l'inductance d'axe en quadrature dans cette disposition.
- Les machines à aimants permanents enterrés dans le rotor (figure I.14 (c)), présentent une saillance inversée. L'inductance d'axe direct est supérieure à l'inductance d'axe en quadrature.

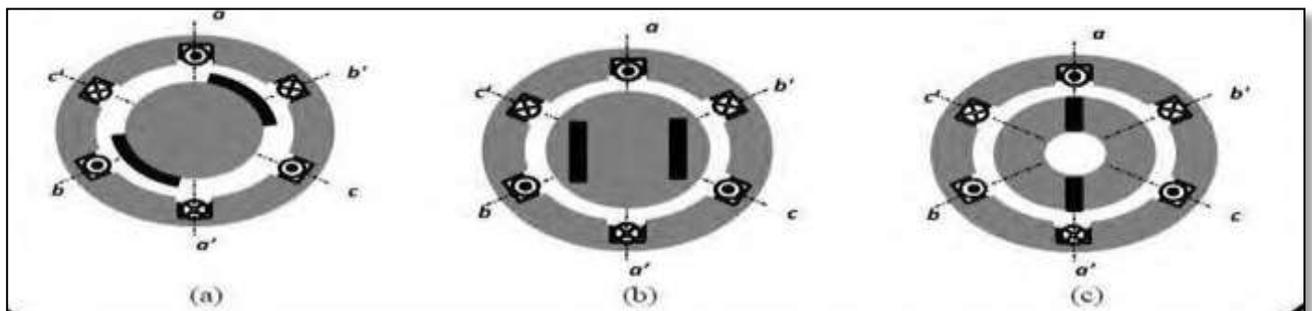


Figure (I.14) : Exemple de structures des aimants au rotor de la MSAP [18]

I.3.5. Machines à réluctance variable

Le principe des machines à réluctance variable (MRV), basé sur la règle du « flux maximal » ou de « réluctance minimale », a été mis en œuvre depuis environ un siècle soit pour produire des courants de fréquence élevée (10 kHz) à l'époque des débuts de la radioélectricité, soit pour réaliser des actionneurs ou relais électromagnétiques (électroaimants à palette ou à noyau

plongeur). Les MRV ont connu de nouveaux développements depuis une trentaine d'années, d'une part comme dispositifs d'entraînement lents à couple élevé, et d'autre part, en association avec des alimentations électroniques de puissance, au sein de systèmes où elles ont pour rôle d'effectuer une conversion électromécanique ou de transmettre une information (par exemple information de position, au moyen d'un moteur pas-à-pas). A l'heure actuelle, les dispositifs à commutation destinés aux entraînements à grande vitesse de rotation utilisent fréquemment des machines à réluctance variable. Le principe de la réluctance variable est resté très marginal. Il fut surpassé par les machines synchrones permettant la réalisation des plus grands générateurs, par les machines asynchrones ou par les machines à courant continu à collecteur. Ces dernières possèdent les mêmes qualités sur une alimentation en courant continu et permettent aussi une variation de vitesse aisée et contrôlable. Si le moteur à réluctance variable, par principe fortement inductif, se trouvait considérablement handicapé par la commutation mécanique de ses courants (celle-ci constituant un facteur évident de limitation de la puissance), il n'a cependant jamais complètement disparu. A cette époque déjà, son intérêt résidait dans ses qualités de simplicité et de robustesse (absence de bobinage rotorique). Ainsi, il a actionné des systèmes d'horlogerie (horloge Froment, 1854), des jouets (petits moteurs Froment monophasés) vers 1900-1910, des dispositifs de transmission électrique (1920, synchronismes dans les bateaux de guerre), des rasoirs (Remington) ou encore, des tourne-disques 78 tr/mn (moteurs à rotor extérieur construits par les Etablissements RAGONOT). Ces moteurs étaient soit de type pas à pas, soit autopilotés mécaniquement, soit synchrones selon les contraintes de fonctionnement et le principe d'alimentation retenu. Le principe de réluctance variable a été également choisi pour la génération des courants hautes fréquences (de quelques kHz à 20 kHz) dans l'alimentation de fours à induction et dans l'émission des ondes radio. On bénéficiait, dans ce dernier cas, d'une part, de la facilité d'obtenir un grand nombre de pôles grâce à un rotor denté passif et, d'autre part, de l'absence de collecteur.

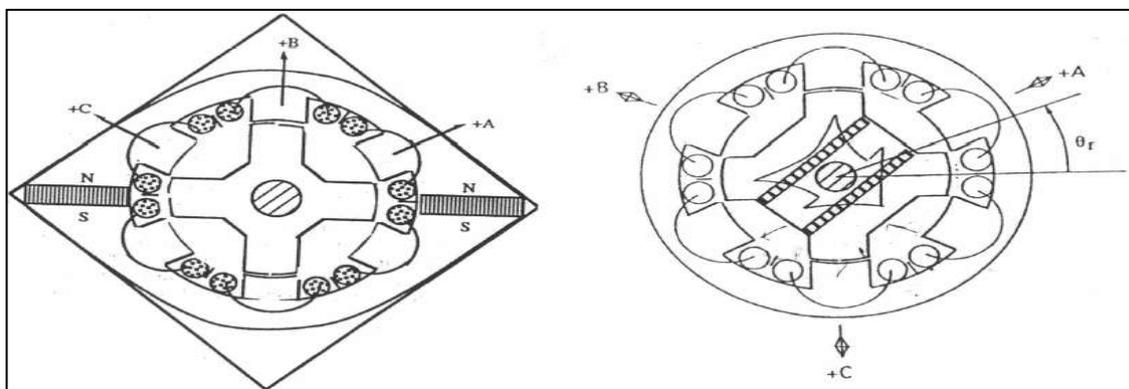


Figure (I.15) : Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance

I.4 Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes machines électriques existantes. Nous avons divisé ces machines en deux catégories selon le type de courant (courant alternatif, et courant continu).

Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation et à la simulation de la chaîne de conversion.

Chapitre II : Modélisation mathématique de la chaîne de conversion

II.1 Introduction

La production d'énergie électrique par des turbines éoliennes nécessite l'utilisation d'une machine électrique, le type de cette machine choisi dépend des facteurs techniques et économiques. Notre travail basé sur l'utilisation d'une machine asynchrone en cascade (MASEC) pour la production de l'électricité par des turbines éoliennes

Ce chapitre est composé de trois parties ; la première présente le modèle mathématique d'une machines asynchrones a rotor bobiné. Dans la deuxième partie, nous utilisons ce dernier modèle de la machine afin de réaliser le modèle de la cascade qui est équivalente au couplage de deux machines. Dans la dernière partie, nous présenterons la modélisation de l'onduleur, ainsi que la commande (MLI) de ce dernier. Finalement nous avons présenté la modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne

II.2 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné

Nous pouvons réalisé le modèle de cascade en passant par le modèle de la machine asynchrone, car le cascade est un couplage de deux machines asynchrones .

Nombreux travaux ont mis en évidence le modèle mathématique de la MADA [11]

II.2.1 Description de la MAS

Une machine asynchrone à rotor bobiné possède trois enroulements identiques montés sur le stator (la partie fixe de la machine), et trois enroulements montés sur le rotor (la partie mobile de la machine). Les bobinages sont décalés dans l'espace d'un angle de 120° et traversés par trois courants triphasés équilibrés. La figure suivant montre la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique

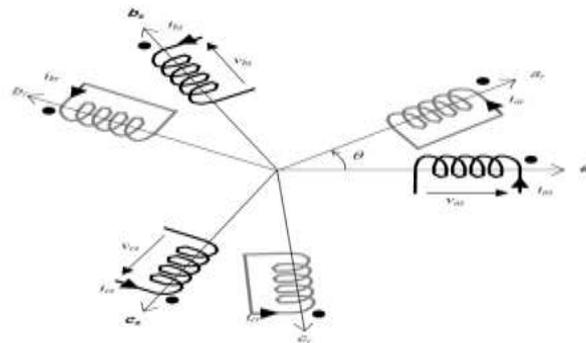


Figure (II. 1) : Représentation schématique des enroulements de la MAS à rotor bobiné

La vitesse du champ tournant par rapport à la pulsation du stator est : $\Omega_s = \omega_s/p$

Ou :

ω_s : pulsation des grandeurs électriques statoriques;

p: nombre de paires de pôles.

II.2.2 Hypothèses simplificatrices

Les modèles mathématique traités dans ce chapitre ont été établis à partir des hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'entrefer est constant d'épaisseur uniforme;
- L'effet d'encoche est négligé;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

II.2.3 Modèle de la MAS à rotor bobiné dans le repère (abc)

L'équation de tension statorique de la MAS à rotor bobiné dans le repère (abc) peut s'écrire sous forme matriciel

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \tag{II. 1}$$

Ou

$$[v_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}, R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \tag{II. 2}$$

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} , sont les tensions simples triphasées au stator de la machine.

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} , sont les courants au stator de la machine.

$\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}$ sont les flux propre circulants au stator de la machine

Les flux statoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II. 3})$$

R_s est la résistance des enroulements statoriques

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductances mutuelles stator-rotor.

Où :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}]^T = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

L'équation de tension rotorique de la MAS à rotor bobiné dans le repère (abc) peut s'écrire sous forme matriciel

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{II. 4})$$

Ou

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} , sont les tensions simples triphasées au rotor de la machine ;

I_{ar}, I_{br}, I_{cr} , sont les courant au rotor de la machine ;

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$, sont les flux propre circulants au stator de la machine.

Les flux rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \quad (\text{II. 5})$$

R_r est la résistance des enroulements rotoriques

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques.

$[M_{rs}]$: Matrice d'inductances mutuelles rotor-stator.

Où :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \quad [M_{rs}]^T = [M_{sr}]$$

Les flux sont exprimés également d'une façon matricielle

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

Où :

$$[\varphi] = [L(\theta)][I]$$

$[(\theta)]$: La matrice inductance qui comporte 36 coefficients dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de θ (qui donne la position du rotor par rapport au stator).

En mettant (II.3) et (II.5) dans, respectivement, (II.2) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{II. 7})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^T \cdot [I_s]) \quad (\text{II. 8})$$

Ces équations sont des équations à coefficients variables puisque la matrice des mutuelles inductances contient des termes qui sont fonction de θ .

II.2.4 Transformation de PARK

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions, et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (Va) statorique et le système d'axe (d, q),

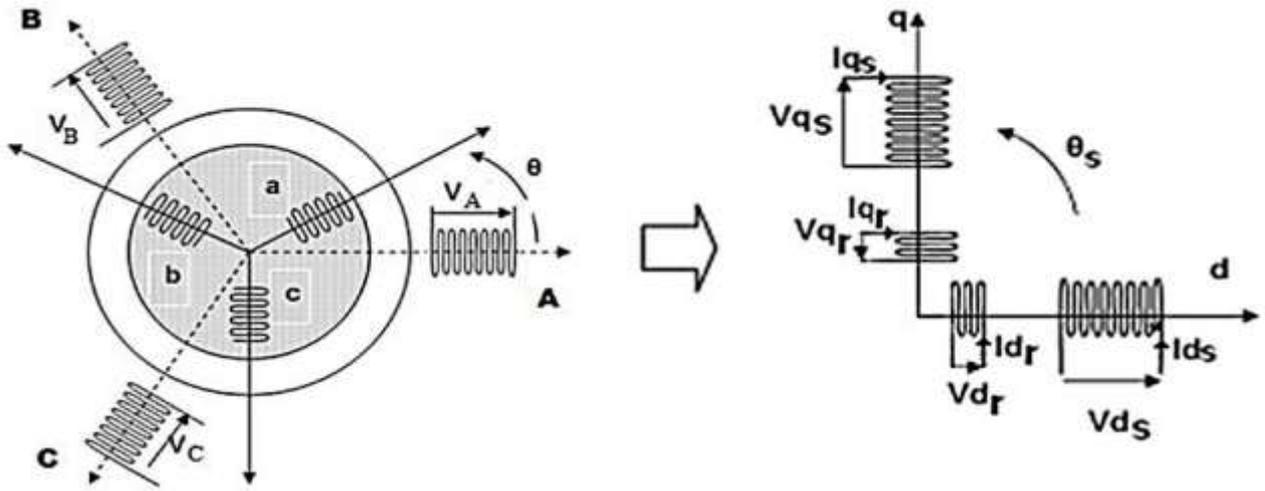


Figure (II.2) Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone [19]

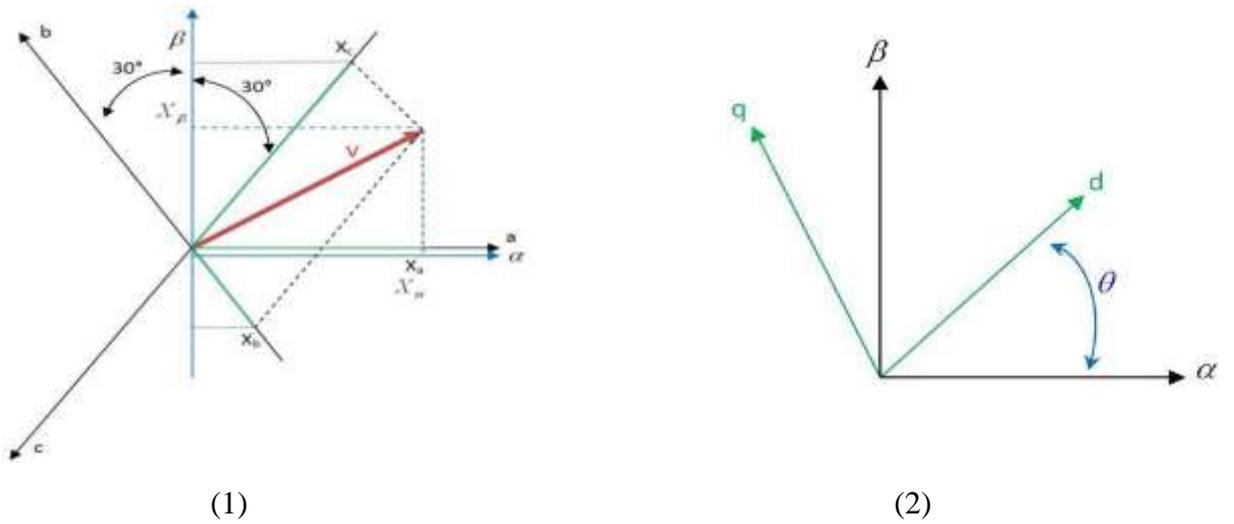


Figure (II.3) : (1) Passage d'une base triphasée (abc) à une base diphasée ($\alpha\beta$) ; (2) Rotation du système ($\alpha\beta$) vers le système (dq) [20]

Les matrices de Park et de Park inverse sont définies sous la forme suivante [19] :

$$[p(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Le lien entre les deux repères est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} Vdqs = [P(\theta_s)]VS \\ Vdqr = [P(\theta_r)]Vr \end{cases}, \quad \begin{cases} Idqs = [P(\theta_s)]IS \\ Idqr = [P(\theta_r)]Ir \end{cases}, \quad \begin{cases} \varphi dqs = [P(\theta_s)]\varphi S \\ \varphi dqr = [P(\theta_r)]\varphi r \end{cases}$$

L'application de la transformation de Park aux équations électriques de la MADA, et dans le référentiel lié au champ tournant nous permet d'aboutir au système équations électriques suivants :

Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

$$\omega_r = p\Omega \quad \text{et} \quad \omega_g = \omega_s - p\Omega$$

Equations des flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

II.2.5 Représentation d'état de la MAS à rotor bobiné

Le système multi variable peut être représenté par des équations d'état. Des choix multiples sont possibles pour le vecteur d'état. Parmi ceux-ci nous prendrons les composantes des courants statoriques et rotoriques

$$x = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

Par développement des flux en fonction des courants, les équations différentielles peuvent être écrites de la manière suivante :

$$[u] = [z] \cdot [i] + [L] \frac{d[i]}{dt} \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$$Z = \begin{bmatrix} R_s & -L_s\omega_s & 0 & -LM\omega_s \\ L_s\omega_s & R_s & L_m\omega_s & 0 \\ 0 & -L_m\omega_g & R_r & -L_r\omega_g \\ L_m\omega_g & 0 & L_r\omega_g & R_r \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

Avec

[z] : Matrice d'impédance.

[L] : Matrice d'inductance

En exprimant l'équation (II.14) en fonction du vecteur d'état, cette dernière peut être écrite comme suit :

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} [Z] \cdot [i] + [L]^{-1} \cdot [U] \quad (\text{II. 15})$$

Elle est de la forme :

$$\frac{d[i]}{dt} = [A] \cdot [i] + [B] \cdot [U] \quad (\text{II. 16})$$

Equivalente à :

$$\frac{d[i]}{dt} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (\text{II. 17})$$

[A] = $-[L]^{-1} \cdot [Z]$: Matrice d'évolution d'état du système.

[B] = $[L]^{-1}$: Matrice de commande du système

II.2.6 Expression du couple de la MAS à rotor bobiné [11], [20]

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

$$(t) = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) + (v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II. 18})$$

Par l'utilisation de l'expression des tensions données par (2.11), on peut écrire :

$$P(t) = [R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)] + [R_r(i_{dr}^2 + i_{qr}^2)] + \left[i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \right] + \left[i_{dr} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \right] + [(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\omega_s] + [(\varphi_{dr}i_{qr} - \varphi_{qr}i_{dr})\omega_g] \quad (II.19)$$

L'expression (II.19) se compose de trois termes

- $[R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)] \cdot [R_r(i_{dr}^2 + i_{qr}^2)]$: (p_j) représentent respectivement la puissance dissipée en pertes par effet Joule dans les enroulements du stator et du rotor ;
- $\left[i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \right] \cdot \left[i_{dr} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \right]$: (p_{mag}) représentent respectivement les variations de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator et du rotor. Elles s'annulent en régime établi ;
- $[(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\omega_s], [(\varphi_{dr}i_{qr} - \varphi_{qr}i_{dr})\omega_g]$: (p_{em}) représentent la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine ou puissance électromagnétique ;

A partir du système d'équation (II. 12) on peut écrire :

$$\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds} = \varphi_{dr}i_{qr} - \varphi_{qr}i_{dr} \quad (II.20)$$

L'expression de la puissance électromagnétique de la machine:

$$p_{em} = [(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\omega_s] + [(\varphi_{dr}i_{qr} - \varphi_{qr}i_{dr})\omega_g] \quad (2.21)$$

En tenant compte de l'égalité (II. 20), on aura

$$p_{em} = (\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\omega_r \quad (2.22)$$

Le couple électromagnétique est définit par :

$$C_e = \frac{p_{em}}{\Omega} = p \frac{p_{em}}{\omega_r} \quad (2.23)$$

On a alors l'expression du couple électromagnétique :

$$C_e = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (2.24)$$

En tenant compte de l'égalité (II. 20) et en utilisant les équations du flux (II. 12), on peut écrire l'équation du couple sous plusieurs formes :

$$C_e = pL_m(i_{dr}i_{qs} - i_{ds}i_{qr}) \quad (II.25)$$

II.3 Modélisation de la machine asynchrone en cascade

Dans ce qui suit, nous utilisons le modèle MADA précédent pour modéliser la cascade de deux machines. Nous allons coupler électriquement et mécaniquement les deux MADAs. En supposant qu'il n'y ait pas des pertes ou des stockages d'énergie dans la connexion[21].

II.3.1 Machines asynchrones en cascade

Dans ce cas, les deux machines seront couplées en connectant leurs arbres et leurs enroulements rotorique avec un branchement inverse. La figure suivante illustre ce couplage. Chaque machine seront identifiés par les indices 1 et 2 correspondants respectivement à la MADA n°1 et à la MADA n°2.

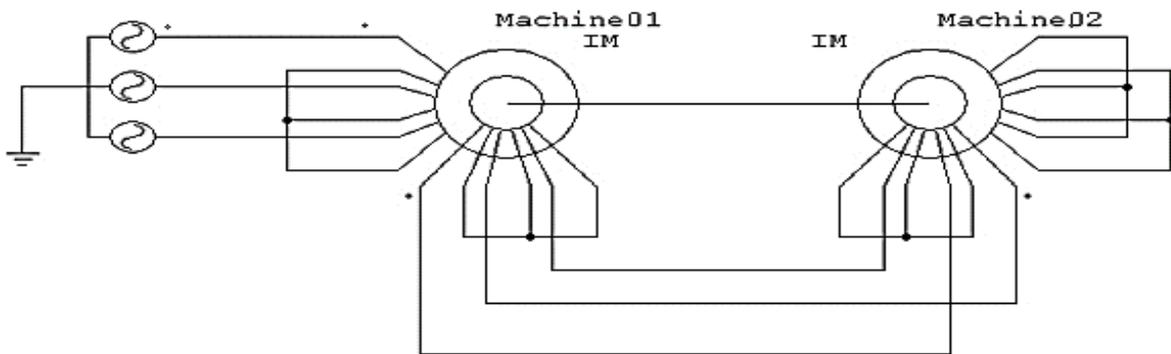


Figure (II.4) : Machine asynchrone en cascade [11].

II.3.2 Modèle de la cascade

Après la transformation de Park. Les équations des tensions et les flux des deux MADAs sont comme suit [22]

La première machine :

Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\phi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1}\phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\phi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1}\phi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1}i_{dr1} + \frac{d\phi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1})\phi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1}i_{qr1} + \frac{d\phi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1})\phi_{dr1} \end{cases} \quad (II. 26)$$

Equations des flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_{m1}i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_{m1}i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1}i_{dr1} + L_{m1}i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1}i_{qr1} + L_{m1}i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

La deuxième machine :

Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{dr2} = R_{r2}i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1})\varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2}i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1})\varphi_{dr2} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2})\varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2})\varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Equations des flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_{m2}i_{dr2} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_{m2}i_{qr2} \\ \varphi_{dr2} = L_{r2}i_{dr2} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = L_{r2}i_{qr2} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

La deuxième machine va être alimentée par son rotor (couplage électrique des deux rotors). On prend deux machine identiques :

$$\begin{cases} v_{dr1} = v_{dr2} = v_{dr} & \begin{cases} i_{dr1} = -i_{dr2} = i_{dr} \\ i_{qr1} = -i_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

On pose :

$$L_r = L_{r1} + L_{r2} ; R_r = R_{r1} + R_{r2} ; \omega_{g1} = \omega_{s1} - \omega_{r1} ; \omega_{s2} = \omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2} \quad (\text{II. 31})$$

En remplaçant les équations des flux (II. 27) et (II. 29) dans les équations des tensions (II. 26) et (II. 28) , en substituant les équations (II. 30), le système d'équations à 8 équations se réduit à 6 équations. On aura alors :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + L_{s1}\frac{di_{ds1}}{dt} + L_{m1}\frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s1}L_{s1}i_{qs1} - \omega_{s1}L_{m1}i_{qr} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + L_{s1}\frac{di_{qs1}}{dt} + L_{m1}\frac{di_{qr}}{dt} + \omega_{s1}L_{s1}i_{ds1} + \omega_{s1}L_{m1}i_{dr} \\ 0 = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + L_{m1}\frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_{g1}L_r i_{qr} - \omega_{g1}L_{m1}i_{qs1} - L_{m2}\frac{di_{ds2}}{dt} + \omega_{g1}L_{m2}i_{qs2} \\ 0 = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + L_{m1}\frac{di_{qs1}}{dt} + \omega_{g1}L_r i_{dr} + \omega_{g1}L_{m1}i_{ds1} - L_{m2}\frac{di_{qs2}}{dt} - \omega_{g1}L_{m2}i_{ds2} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + L_{s2}\frac{di_{ds2}}{dt} - L_{m2}\frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s2}L_{s2}i_{qs2} + \omega_{s2}L_{m2}i_{qr} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + L_{s2}\frac{di_{qs2}}{dt} - L_{m2}\frac{di_{dr}}{dt} + \omega_{s2}L_{s2}i_{ds2} - \omega_{s2}L_{m2}i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

Ce système peut être résumé comme suit :

$$[U] = [Z] \cdot [i] + [L] \frac{d[i]}{dt} \quad (\text{II. 33})$$

Où :

$[U]$, $[i]$ Vecteurs des tensions et courants respectivement dans le repère de Park.

Avec :

$$Z = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_{s1}L_{s1} & 0 & -\omega_{s1}L_{m1} & 0 & 0 \\ \omega_{s1}L_{s1} & R_{s1} & \omega_{s1}L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_{g1}L_{m1} & R_r & -\omega_{g1}L_r & 0 & \omega_{g1}L_{m2} \\ \omega_{g1}L_{m1} & 0 & \omega_{g1}L_r & R_r & -\omega_{g1}L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{s2}L_{m2} & R_{s2} & -\omega_{s2}L_{s2} \\ 0 & 0 & -\omega_{s2}L_{m2} & 0 & \omega_{s2}L_{s2} & R_{s2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 34})$$

Et ;

$$L = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -L_{m2} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -L_{m2} \\ 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & L_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & L_{s2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 35})$$

On peut décomposer la matrice Z ainsi :

$$Z = A + \omega_{s1}B + \omega_{r1}C + \omega_{r2}D$$

Avec ;

$$A = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -L_{s1} & 0 & -L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -L_{m2} \\ -L_{m1} & 0 & -L_r & 0 & L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & L_{s2} \\ 0 & 0 & L_{m2} & 0 & -L_{s2} & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & L_{s2} \\ 0 & 0 & L_{m2} & 0 & -L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

L'équation du couple électromagnétique de la cascade sera la somme des couples électromagnétique des deux machines :

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} = p_1 L_{m1} (i_{dr} i_{qs1} - i_{ds1} i_{qr}) + p_2 L_{m2} (i_{dr} i_{qs2} - i_{ds2} i_{qr}) \quad (\text{II. 36})$$

Si nous avons deux machines identiques c'est-à-dire $p_1 = p_2 = p$ et $L_{m1} = L_{m2} = L_m$ alors l'équation du couple sera :

$$C_e = p L_m [i_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - i_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II. 37})$$

II.4 Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation d'un démarrage direct de la MASEC sont réalisés en utilisant Matlab-simulink. Les enroulements de stator de la première machine sont couplés directement sur le réseau triphasé et les enroulements du stator de la deuxième machine sont en court-circuit. On applique à la machine une charge $C_r = 22000 \text{ N.m}$ (couple nominal d'une machine) à la période $t = 3.5 \text{ sec}$. On considère deux machines identiques ($p_1 = p_2 = 2$).

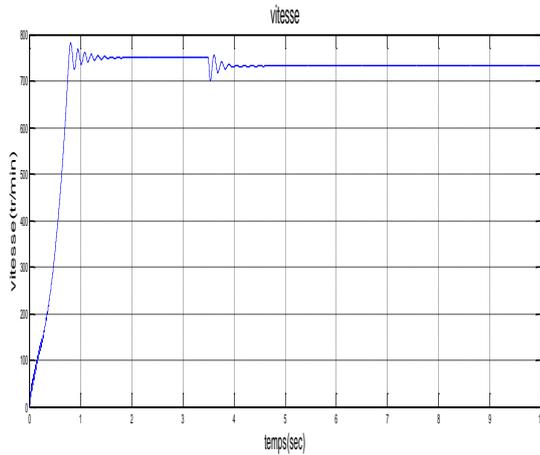


Figure (II.5) : la vitesse da la MASEC

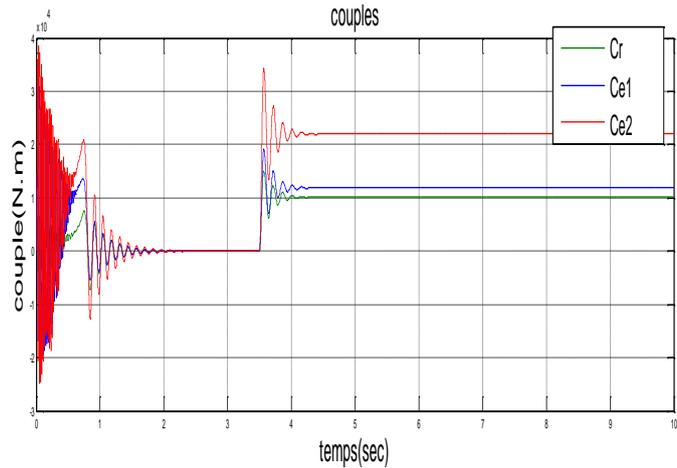


Figure (II.6) : couples électromagnétique

On remarque que la vitesse dans la premiere période augmente jusqu' à 750 tr/min car $v=60f/p$ Avec : f (la fréquence)=50 hz et $p=p1+p2=4$ donc $V=60*50/4=750\text{tr/min}$ Et après 3.5 seconde on applique à la machine une charge $C_r = 22000 \text{ N.m}$ (la figure) et on remarque que la vitesse est diminué jusqu'à 732 tr/min

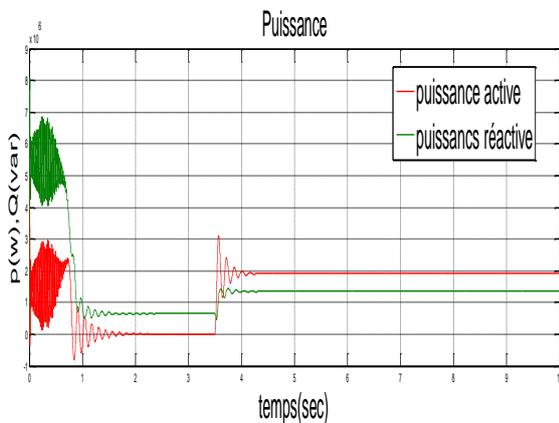


Figure (II.7) : puissance active et réactive

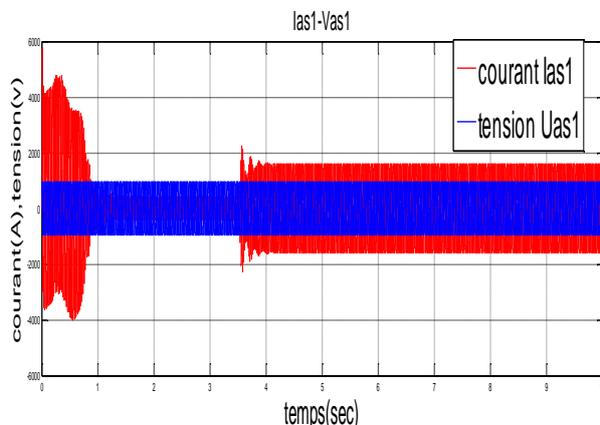


figure (II.8) : courant et tension du premier stator

Le figure (II.7) représente la puissance active et réactive de première machine, la puissance active et réactive sont positives donc la machine absorbe une énergie active et réactive (mode moteur). Avide la puissance active est nulle et la puissance réactive est positive , après l'application de couple résistant on remarque que la puissance réactive augmente et la puissance active et supérieur à la puissance réactive

Le figure (II.8) représente le courant et la tension dans le premier stator (sur l'axe a) on remarque que si on applique une charge, le courant est augmenté et la tension reste à ça valeur.

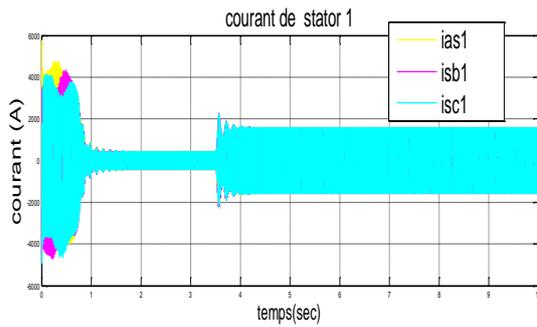


Figure (II.9) : courant de stator 1

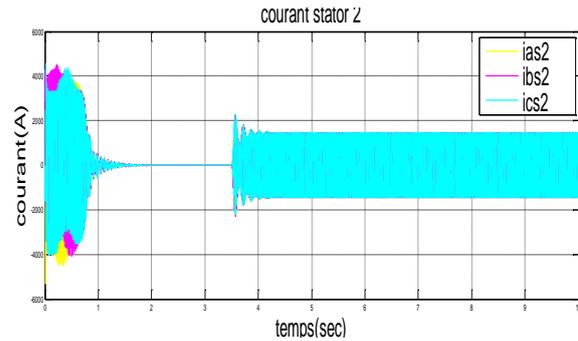


Figure (II.10) : courant de stator 2

Après les figures (II.9),(II.10) on remarque que après l'application de couple les courants sont augmentés

II.5 Modélisation du convertisseur MLI

L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée [18].

Le redresseur MLI permet de convertir une grandeur électrique du régime alternatif vers le régime continu réalisé à l'aide de semi-conducteurs (interrupteurs) qui sont généralement des transistors en parallèle avec des diodes montées à des bras et commandées à l'ouverture et à la fermeture [23].

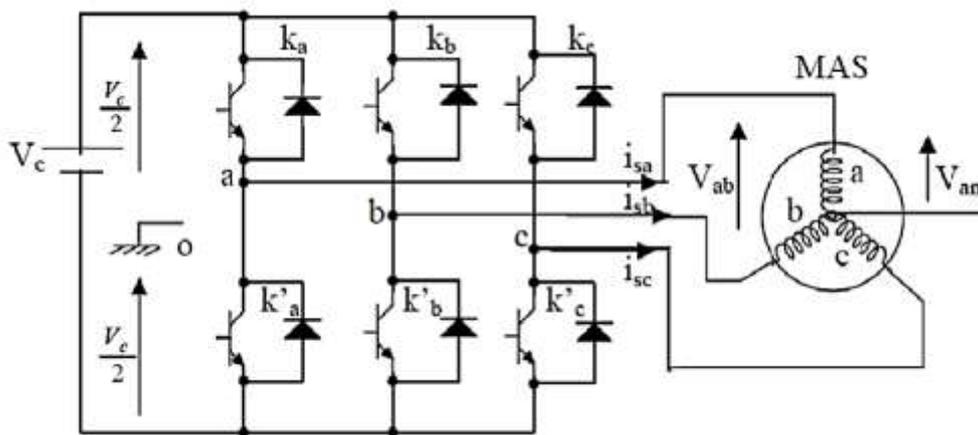


Figure (II.11) : Schématisation de l'ensemble convertisseur-MAS [8].

Afin de simplifier la modélisation du redresseur, nous considérons les interrupteurs comme étant idéaux, c'est-à-dire :

- Résistance nulle à l'état passant.
- Résistance infinie à l'état bloqué.

- Réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, l'étude du convertisseur est divisée en trois parties :

Le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans Ce contexte, la fonction des interrupteurs d'établi un lien entre le coté alternatif et le côté Continu.

Etant donné que ces interrupteurs sont complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [18]:

$$S = \begin{cases} 1. \bar{S} = 0 \\ 0. \bar{S} = 1 \end{cases} \quad \text{pour } S = a.b.c$$

Les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de, v_{dc} [24] :

La somme des courants d'entrée, i_a, i_b, i_c sont nulle:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II. 38})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par ;

$$\begin{cases} U_{s_{ab}} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{s_{bc}} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ U_{s_{ca}} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement du neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \cdot V_{dc} \end{cases}$$

On déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu comme suit :

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_l \quad (\text{II. 41})$$

i_l : Le courant de charge du redresseur.

II.6 Commande de redresseur par la technique MLI triangulo-sinusoidale

Dans notre travail, le redresseur est commandé par la technique de modulation de la largeur d’impulsion (MLI) à porteuse triangulaire. Elle consiste à comparer l’erreur entre le signal de tension et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d’une amplitude et d’une fréquence fixées [35].

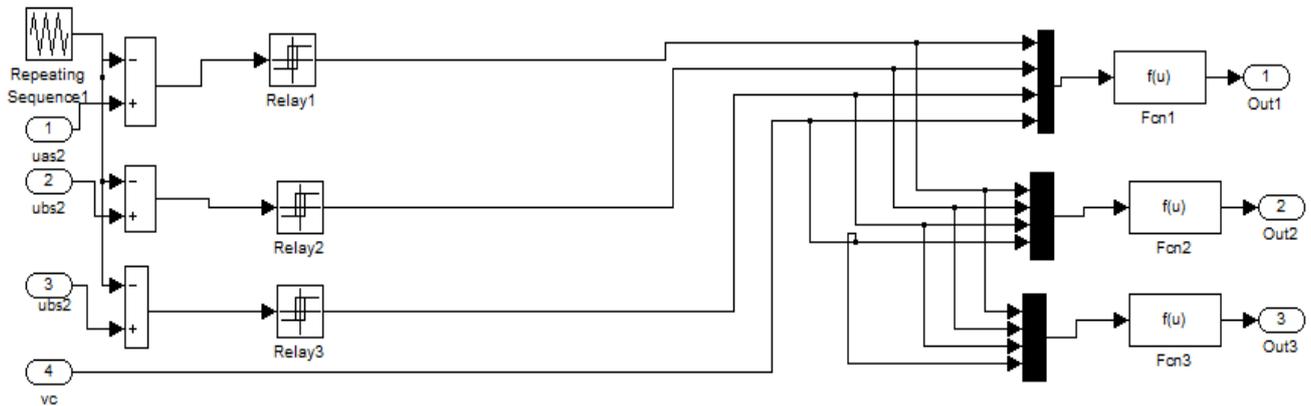


Figure (II.12) : Schéma bloc de la technique triangulo-sinusoidale sous Simulink

La porteuse ainsi que la modulante présentes dans la commande «sinus-triangle» sont représentées dans la figure suivante :

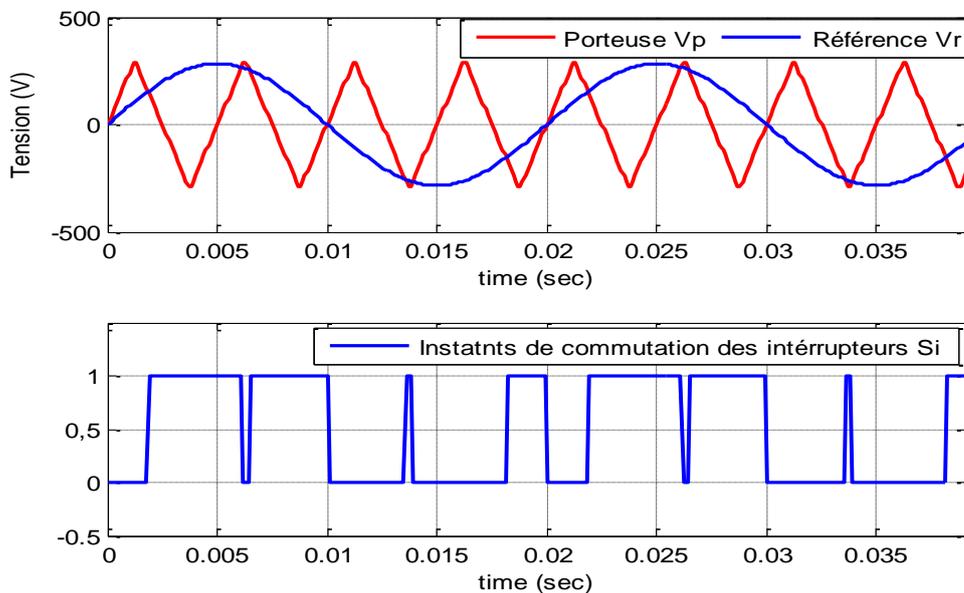


Figure (II.13) : Exemple de chronogramme d’une commande «sinus-triangle»

II.7 Modélisation de la turbine

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d’entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

La puissance du vent est définie comme suit [33]

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v_{vent}^3 \quad (\text{II. 42})$$

Avec :

ρ : Densité de l'air (1,22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15 C°).

S : Surface circulaire balayée par la turbine.

v_{vent} : La vitesse de vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [24] :

$$P_{aer} = C_p P_{vent} \quad (\text{II. 43})$$

Avec :

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{14-0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II. 44})$$

λ : est le ratio de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v_{vent}} \quad (\text{II. 45})$$

β : est l'angle d'orientation des pales

Ω_t : vitesse angulaire mécanique (rad /s mécanique) de la turbine.

V : vitesse du vent (m/s).

R : rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

La figure (II.14) représente la variation du C_p en fonction du ratio λ de vitesse et de l'angle d'orientation de la pale β .

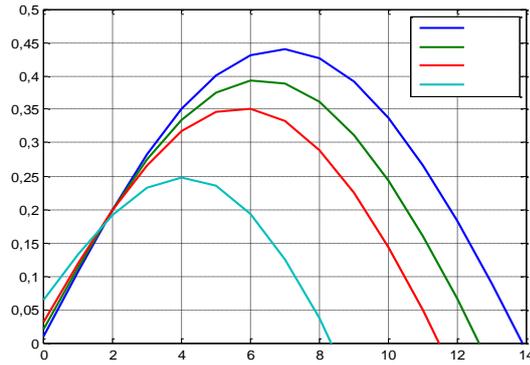


Figure (II.14) : Le Coefficient de puissance (C_p) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine(λ).

II.7.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, [26].

$$C_{arbre} = \frac{C_{aero}}{G} \tag{II. 46}$$

Avec :

C_{arbre} : Couple issu du multiplicateur.

C_{aero} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II. 47}$$

II.7.2 Modèle de l'arbre

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit [27]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum des\ couples \tag{II. 48}$$

J: Inertie totale comprenant l'inertie de la génératrice et celle de la turbine.

f : coefficient de frottement visqueux.

La figure-2-3 montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

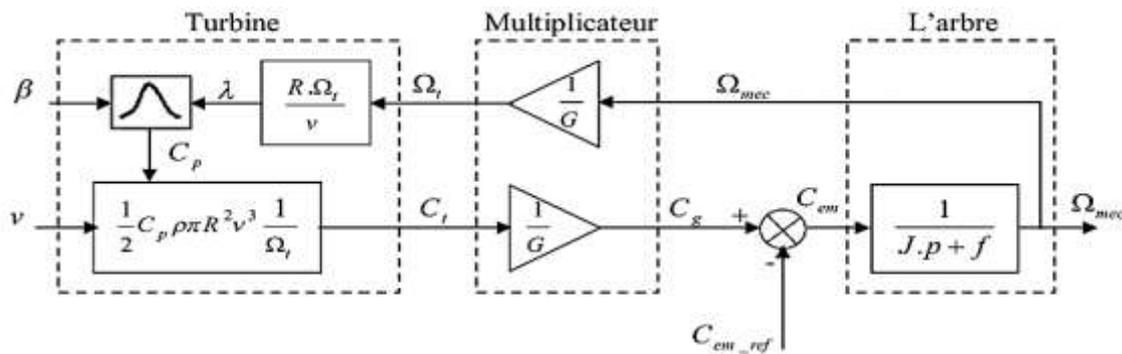
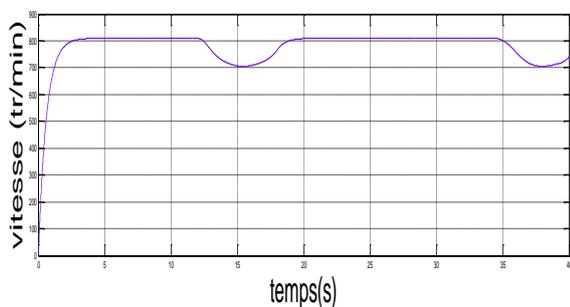
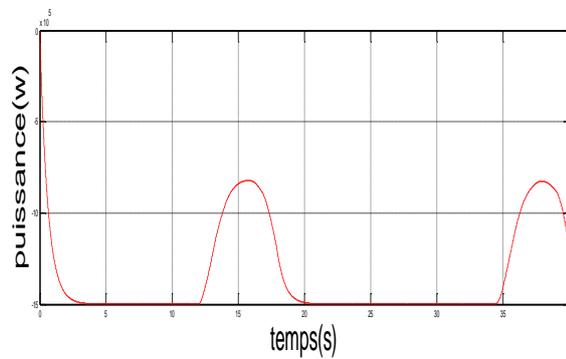


Figure (II.15) : Schéma bloc de la turbine.

II.7.3 Résultat de simulation



Figure(II.16) : Vitesse de rotation de la turbine



figure(II.17) : puissance mécanique de la turbine

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobinée puis la modélisation de MASEC. Premièrement nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à rotor bobinée dans sa structure générale en se basant sur ses équations électriques, magnétiques et mécanique. Puis nous avons utilisé ce modèle de la machines afin de réaliser le modèle de la cascade qui est équivalente au couplage de deux machines, ensuite pour des raisons de simplification, nous avons établi le modèle dans un système d'axe biphasé lié au stator grâce à la transformation de Park puis nous avons modélisé le convertisseur de puissance MLI. Le prochain chapitre sera consacré à la commande de la MASEC. Finalement on a voire le modèle mathématique et la simulation des comportements de l'éolienne.

Chapitre III : Commande de la MASEC par réseaux de neurones (RNA)

III.1 introduction

Après la modélisation de la machine, dans ce chapitre nous allons voir le modèle de commande, qui permettra un contrôle indépendant des puissances active et réactive de MASEC. Puis on va voir le principe et les concepts de la commande vectorielle appliquée à la machine et nous testerons la robustesse de la machine vis-à-vis des variations paramétriques, avec des vitesses différentes, et nous présenterons les résultats obtenus par simulation, avec et sans contraintes.

En dernière temps on va améliorer la commande vectorielle par une commande artificielle basée sur réseau de neurone et on va voir la différence entre les deux commandes

III.2 Description du système étudié

Le premier stator de MASEC est relié directement au réseau et on crée un deuxième chemin à travers le stator 2 pour ne pas surcharger le stator 1, ce qui revient, dans ce cas, à alimenter le réseau du maximum de puissance possible [10], [11]. Pour pouvoir contrôler la production d'électricité de l'éolienne, nous réaliserons une commande qui permettra un contrôle indépendant des puissances active et réactive du stator 1, en établissant les équations qui lient les tensions du stator 2, générées par un convertisseur de fréquence, aux puissances active et réactive du stator 1. Le système à étudier est illustré sur la figure (III.1).

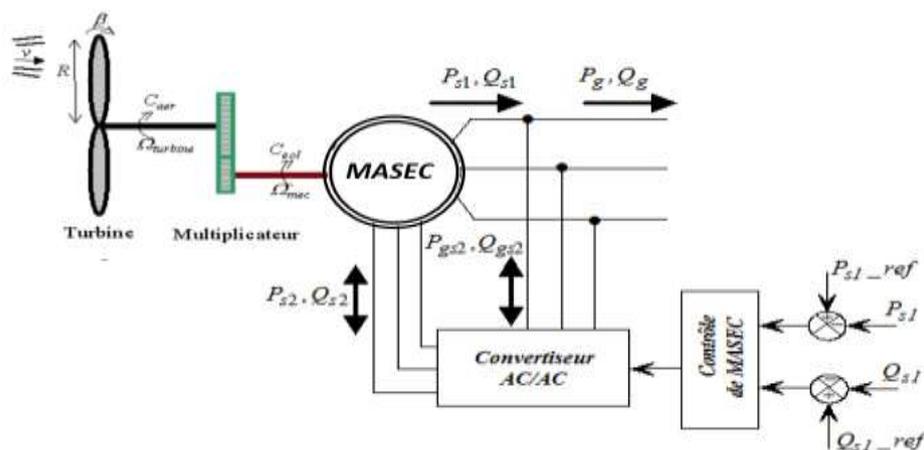


Figure (III.1) : Schéma du système étudié.

III.3 Contrôle de puissance de la MASEC

L'objectif du contrôle de puissance de la MASEC consiste à lui faire suivre une consigne en puissance avec une dynamique électrique.

Les puissances actives et réactives du stator 1 et du stator 2 sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1}i_{ds1} - v_{ds1}i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} P_{s2} = v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \\ Q_{s2} = v_{qs2}i_{ds2} - v_{ds2}i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Les puissances active et réactive du réseau s'expriment :

$$\begin{cases} P_g = P_{s1} + P_{s2} \\ Q_g = Q_{s1} + Q_{s2} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

L'expression du couple électromagnétique :

$$C_e = p_1(\varphi_{ds1}i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1}) + p_2(\varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \quad (\text{III.4})$$

Si on suppose deux machines identiques c'est à dire $p = p_1 = p_2$, alors le couple devient :

$$C_e = p(\varphi_{ds1}i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1} + \varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \quad (\text{III.5})$$

III.3.1 Fonctionnement de la MASEC dans les quatre quadrants

Grâce au convertisseur de puissance bidirectionnel connecté à l'enroulement du stator 2, la MASEC est contrôlable. Par conséquent, la MASEC peut fonctionner en moteur ou en générateur aux vitesses hypo synchrone et hyper synchrone.

La MASEC possède quatre modes de fonctionnement, parmi lesquels P_{s1} , P_{s2} et P_m sont la puissance délivrée au réseau (ou fournie par le réseau) par le stator 1, la puissance traversant le stator 2, et la puissance mécanique. [10], [11].

Les différents modes de fonctionnement de la MASEC sont illustrés dans la figure (III.2), où la convention suivante est adoptée : flèche de P_{s1} , P_{s2} dirigée vers l'armature est comptée négativement ou absorption de puissance, et inversement (flèche de P_{s1} , P_{s2}) est comptée positivement ou fourniture de puissance.

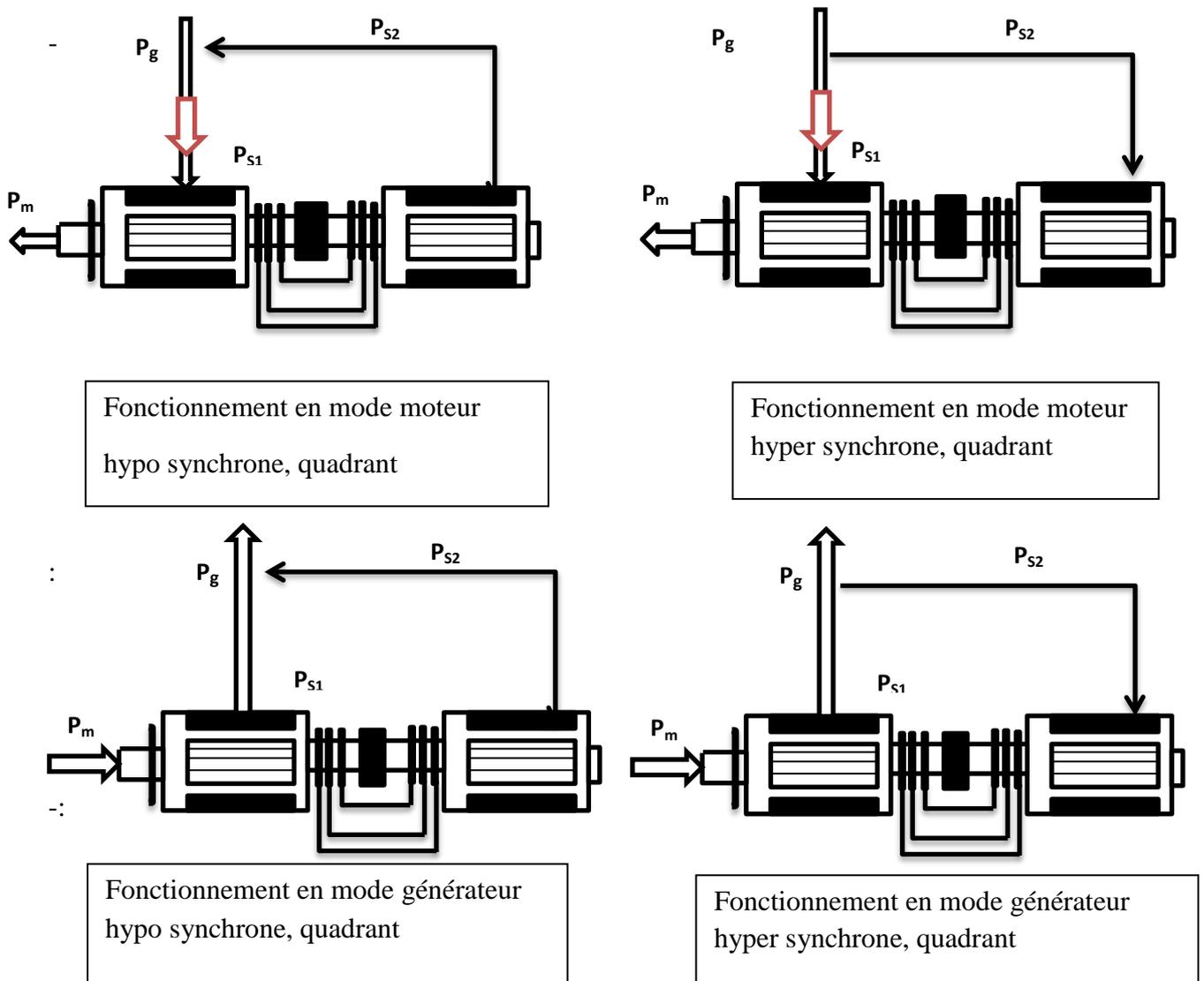


Figure (III.2) : Les différents modes de fonctionnement de la MASEC

III.3.2 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1

On suivra les mêmes étapes pour la réalisation du contrôle indépendant de puissance de la MADA, citées dans [23], afin de réaliser le découplage de puissances de la MASEC [10], [11], [27].

En orientant le repère (dq) afin que l'axe d soit aligné sur le flux du premier stator φ_{s1} , le modèle obtenu de la MASEC se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Le flux du premier stator suivant l'axe q est constamment nul.

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} \\ \varphi_{qs1} = 0 \end{cases} \tag{III.6}$$

En utilisant la simplification (III.6) pour simplifier les équations des flux comme suite :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} = L_{s1}i_{ds1} + L_{m1}i_{dr} \\ \varphi_{qs1} = 0 = L_{s1}i_{qs1} + L_{m1}i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les courants du stator 1 en fonction des courants du rotor sont :

$$\begin{cases} i_{ds1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{dr} + \frac{1}{L_{s1}}\varphi_{s1} \\ i_{qs1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

L'équation du couple électromagnétique (III.5), devient :

$$C_e = p(\varphi_{s1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2}) \quad (\text{III.9})$$

En supposant le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique φ_{s1} constant. De plus, si on néglige la résistance des enroulements du stator 1 ($R_{s1} = 0$), hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions du stator 1 se réduisent à :

$$\begin{cases} v_{ds1} = 0 \\ v_{qs1} = V_s = \omega_{s1}\varphi_{s1} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Du fait que les enroulements des rotors sont couplés électriquement, on aura alors l'égalité suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_{r1}i_{dr} + L_{m1}i_{ds1} = -L_{r2}i_{dr} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr} = L_{r1}i_{qr} + L_{m1}i_{qs1} = -L_{r2}i_{qr} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

On pose :

$$C = \frac{L_{m2}}{L_{r1} + L_{r2} - \frac{L_{m1}^2}{L_{s1}}}$$

En remplaçant les courants de l'équation (III.8) dans l'égalité (III.11), on trouve

$$\begin{cases} i_{dr} = C \cdot i_{ds2} - C \cdot \frac{L_{m1}V_s}{\omega_{s1}L_{s1}L_{m2}} \\ i_{qr} = C \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

A partir des équations (III.8) et (III.11), on peut écrire les relations liant les courants du stator 1 et 2 :

$$\begin{cases} i_{ds1} = \frac{V_s}{\omega_{s1}L_{s1}} \left(1 + \frac{C \cdot L_{m1}^2}{L_{s1}L_{m2}} \right) - C \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{ds2} \\ i_{qs1} = -C \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Avec : } \varphi_{s1} = \frac{V_s}{\omega_{s1}}$$

$$\text{Les glissements sont: } s_1 = \frac{\omega_{s1} - p_1 \Omega}{\omega_{s1}} ; s_2 = \frac{s_1 \cdot \omega_{s1} - p_2 \Omega}{s_1 \cdot \omega_{s1}}$$

Le glissement total de la MASEC devient :

$$s = s_1 \cdot s_2 = \frac{\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_{s1}} = \frac{\omega_{s1} - \Omega(p_1 + p_2)}{\omega_{s1}} \quad (\text{III.14})$$

Il en découle que : $\omega_{s2} = s \cdot \omega_{s1}$

III.3.3 Relation entre la tension du deuxième stator et son courant

On remplace l'équation (III.12) dans (III.14), le flux de deuxième stator sera :

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{ds2} + C \cdot V_s \frac{L_{m1}}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \\ \varphi_{qs2} = (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Sachant que :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + s \cdot \omega_{s1} \cdot \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

En remplaçant les flux (III.15), dans les expressions des tensions du deuxième stator (III.16), on aura :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{ds2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{qs2}}{dt} + s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{ds2} + C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants du stator 2 diphasés disparaissent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})i_{ds2} + C \cdot V_s \frac{L_{m1}}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

v_{ds2} Et v_{qs2} sont les composantes diphasées des tensions du deuxième stator à imposer à la machine pour obtenir les courants i_{ds2} et i_{qs2} voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $C \cdot V_s \frac{L_{m1}}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur

III.3.4 Relation entre la puissance du premier stator et le courant deuxième stator

Tenant compte des hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($v_{ds1} = 0$), les puissances active et réactive de l'équation (III.1), deviendront :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{qs1} i_{qs1} = V_s i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1} i_{ds1} = V_s i_{ds1} \end{cases} \quad (III.19)$$

En substituant l'équation (III.13) dans (III.19) et en approximant φ_{s1} par $\frac{V_s}{\omega_{s1}}$, les expressions des puissances, active P_{s1} et réactive Q_{s1} deviennent alors :

$$\begin{cases} P_{s1} = -C \cdot V_s \frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{qs2} \\ Q_{s1} = \frac{V_s^2}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \left(1 + \frac{C \cdot L_{m1}^2}{L_{s1} \cdot L_{m2}} \right) - C \cdot V_s \frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{ds2} \end{cases} \quad (III.20)$$

Le schéma bloc du système électrique à réguler tiré des équations (III.17) et (III.20) est illustré dans la figure (III.3).

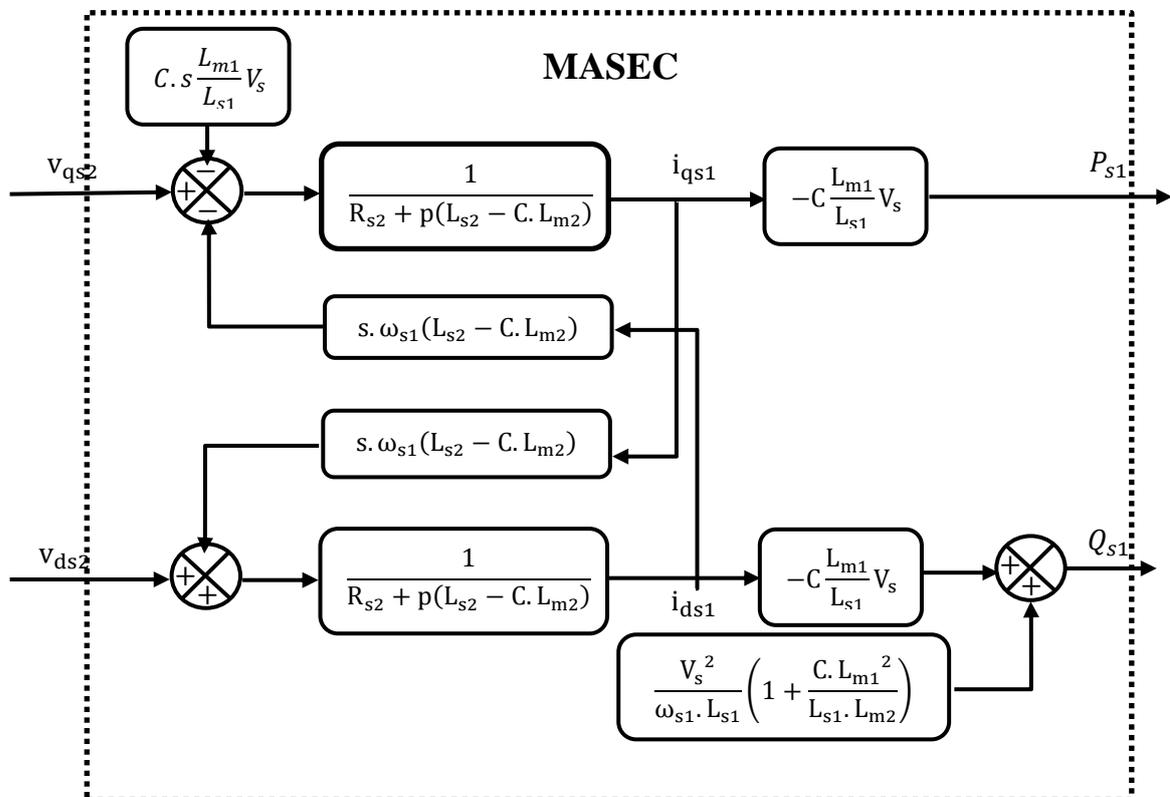


Figure (III.3) : Schéma-bloc du système à réguler.

La figure montre la fonction de transfert du premier ordre des deux axes qui relie la tension du stator 2 à la puissance active et réactive du stator 1. De plus, en raison de la faible valeur de glissement, cela montre également que l'on peut implémenter une commande vectoriel direct sans difficulté. En raison de l'influence de la pression de couplage, chaque axe peut être commandé indépendamment, et chaque axe a son propre régulateur (PI). Les grandeurs de référence de ces régulateurs sont :

Puissance active stator 1 axe q et puissance réactive stator 1 axe d

III.4 Commande vectorielle direct de la MASEC

Le but de la commande vectorielle de puissance MASEC est de lui faire suivre une consigne de puissance électriquement dynamique. Le schéma bloc de la commande vectorielle est montré sur la figure (III.4).

Dans notre exemple, on pense que la machine est connectée à un réseau stable, donc la tension V_s est constante

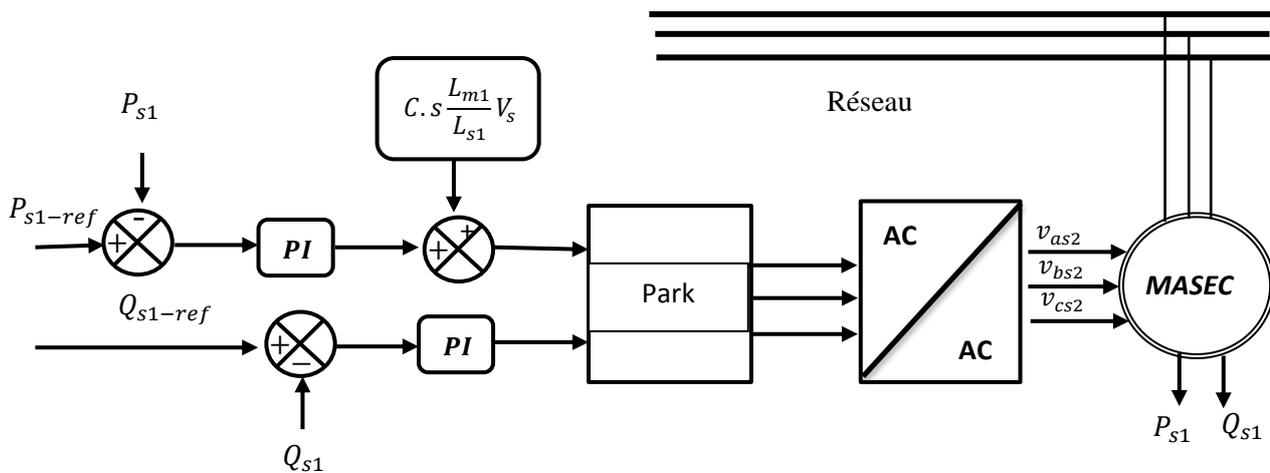


Figure (III.4) : Schéma-bloc de la commande vectorielle en puissance.

III.4.1 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MASEC, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables.

La figure (III.5) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (III.4) :

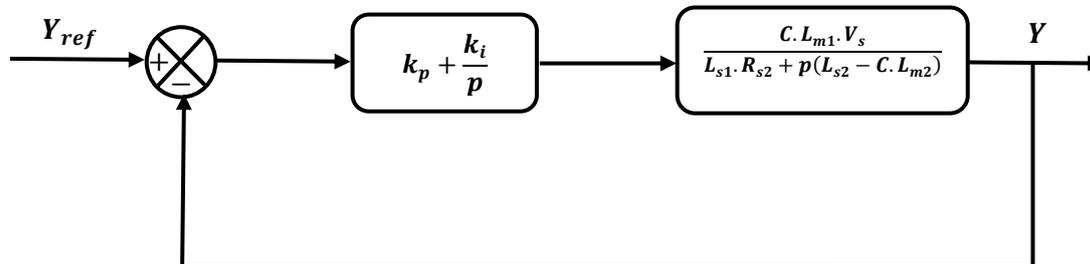


Figure (III.5) : Représentation schématique de la boucle de régulation de la puissance du premier stator.

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{P + \frac{k_i}{P} \frac{C.L_{m1}.V_s}{L_{s1}(L_{s2} - C.L_{m2})}}{\frac{P}{k_p} \frac{R_{s2}}{P + (L_{s2} - C.L_{m2})}} \quad (III.21)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_{s2}}{(L_{s2} - C.L_{m2})} \quad (III.22)$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation de pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains des correcteurs sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace [28].

Si on effectue la compensation, on obtient la fonction de transfert en boucle fermé (FTBF) suivante :

$$FTBO = \frac{1}{1 + P \frac{L_{s1}(L_{s2} - C.L_{m2})}{k_p.C.L_{m1}.V_s}} \quad (III.23)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1+\tau_r P} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{Ou : } \tau_r = \frac{1}{1+p \frac{L_{s1}(L_{s2}-C.L_{m2})}{k_p.C.L_{m1}.V_s}}$$

Avec : τ_r Constante de temps.

Le temps de réponse du système est de l'ordre de 10ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables [11].

Les gains des correcteurs sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} k_p = \frac{L_{s1}(L_{s2}-C.L_{m2})}{\tau_r.C.L_{m1}.V_s} \\ k_i = k_p \frac{R_{s2}}{(L_{s2}-C.L_{m2})} = \frac{L_{s1}.R_{s2}}{\tau_r.C.L_{m1}.V_s} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

III.4.2 Résultats de simulation

En vue de vérifier les performances de la commande vectorielle mise en œuvre, nous allons élaborer deux tests, à savoir : sans et avec contraintes. Dans ce dernier cas, nous augmenterons les valeurs des résistances ainsi que celles des inductances propres au modèle de la MASEC.

On applique à la MASEC deux échelons de vitesse, l'un supérieur et l'autre inférieur à la vitesse du synchronisme. Les puissances de références actives $P_{s1}=1.5\text{Mw}$ Entre [0-4s ;12-16s] et $P_{s1}=-1.5\text{Mw}$ entre [4-12s]

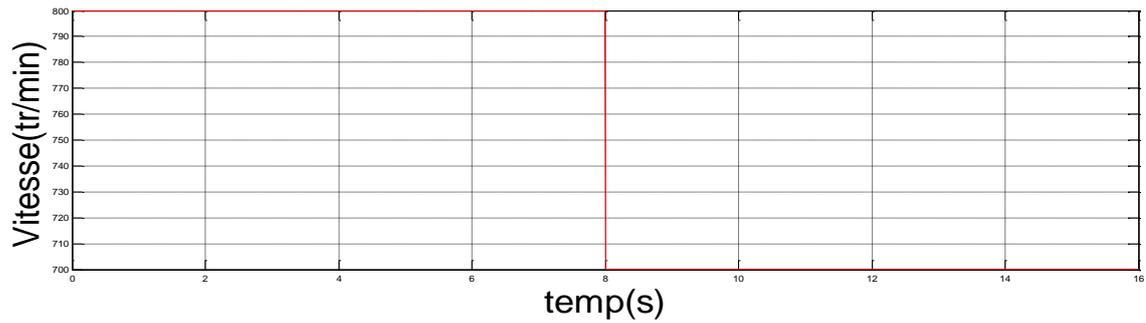


Figure (III.6) : La vitesse de rotation de MASEC

a) Sans application de contraintes.

Les paramètres de la machine sont idéals

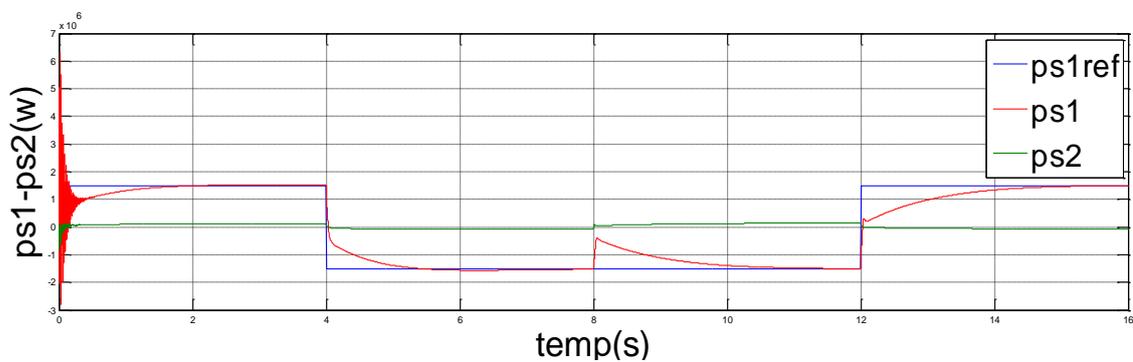


Figure (III.7) : La puissance active de stator 1 et stator 2

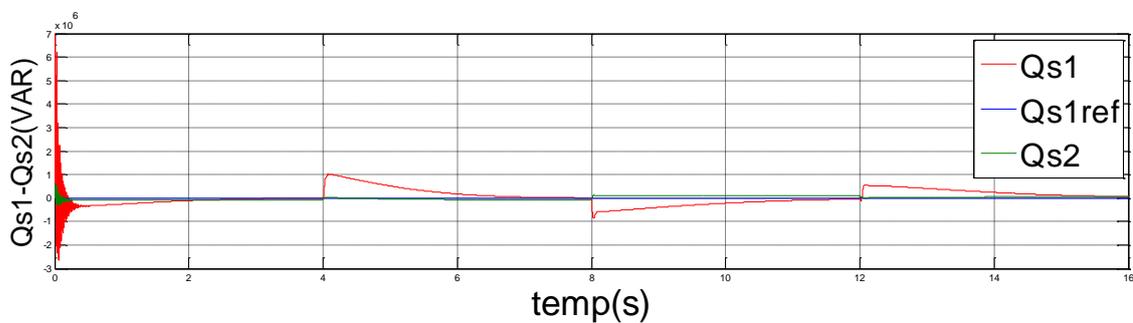


Figure (III.8) : La puissance réactive de stator 1

Dans [0s-8s] la vitesse de rotation est fixée à 800 tr/min (supérieure à la vitesse de synchronisme) (figure 6), par conséquent le glissement est négatif ($s < 0$).

- Durant [0s-4s] on remarque que P_{s1} et P_{s2} sont positives, donc les deux stators 1 et 2 absorbent l'énergie active. On est dans le mode moteur hyper synchrone (Quadrant 02).
- Durant [4s-8s] P_{s1} et P_{s2} sont négatives, donc les deux stators 1 et 2 fournissent de l'énergie active. On est dans le mode génératrice hyper synchrone (quadrant 03)

Durant [8s-16s] la vitesse de rotation est fixée à 700 tr/min (inférieur à la vitesse de synchronisme),

- Durant [8s-12s] P_{s1} est négative et P_{s2} est positive donc le stator 1 fournit de l'énergie active et une partie transite par ce dernier et réabsorbée par le stator 02. On est dans le mode génératrice hypo synchrone (quadrant 04).
- Durant [12s-16s] P_{s1} est positive et P_{s2} est négative, ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement (la cascade hypo synchrone, quadrant 01).

On remarque que la puissance réactive de stator Q_{s1} suit sa valeur de référence avec une certaine erreur $Q_{s1}=0$

Contre celle de stator 2 est positive dans le fonctionnement hyper synchrone et négatif dans le fonctionnement hypo synchrone

Les puissances active et réactive suivent le signal de référence par un pourcentage de 70%

b) Avec application de contraintes.

Afin d'étudier les variations des différentes grandeurs en fonction des contraintes appliquées, et en vue d'analyser les conditions extrêmes de fonctionnement, nous allons augmenter les résistances de 40% et les inductances de 20%

Résultat de simulation :

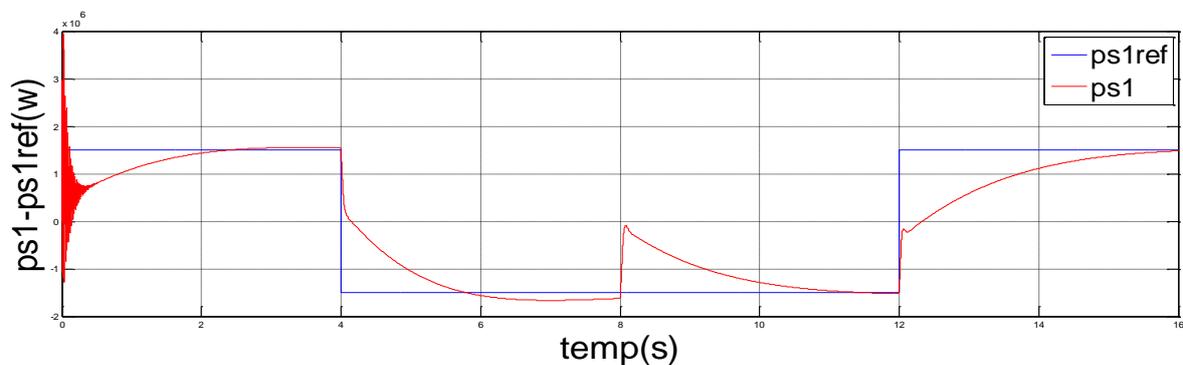


Figure (III.9) : puissance active après l'application des contraintes

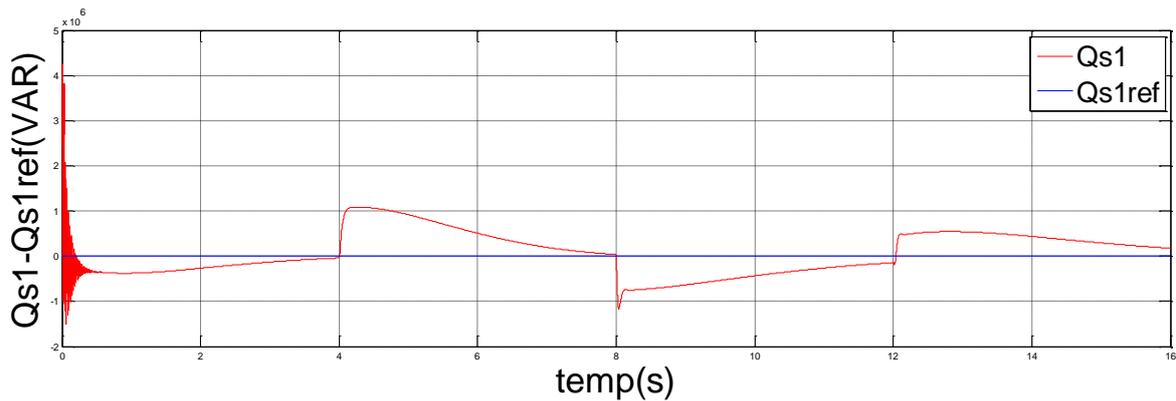


Figure (III.10) : puissance réactif après l'application des contraintes

Après l'augmentation des résistances et des inductances, on remarque une diminution du pourcentage de suivi de la référence

III.5 Commande intelligente de la MASEC

III.5.1 Introduction

L'un des défis auxquels sont confrontés les êtres humains aujourd'hui est de copier la nature et de copier les modèles naturels sans raisonnement et sans comportement uniques. Le réseau de neurones est né envie, ils forment une série de fonctions non linéaires paramétrées utilisées dans de nombreux domaines (physique, chimie, biologie, finance, etc.), notamment la modélisation des procédés et synthèse des lois de commande

Dans ce travail la première partie est consacrée à un aperçu de cette technique à travers une présentation générale du RNA. La seconde partie, quant à elle, vise à étudier le renforcement des régulateurs classiques (PI) par des blocs à base de réseaux de neurones.

III.5.2 réseaux de neurones

L'intelligence artificielle est une branche l'informatique fondamentale qui s'est développée énormément dans nos jours. Elle a pour objectif d'assimiler ou d'introduire le fonctionnement du cerveau dans des applications industrielles [29].

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés des processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle, chaque'un de ces processeurs calcule une sortie unique qui s'appelle la cible sur une base de données qu'il reçoit (l'entrée) [29].

D'autre façon, ils sont des cellules de base du système nerveux central. Chaque neurone reçoit des influx nerveux à travers ses dendrites (récepteurs), les intègre pour en former un nouvel influx nerveux qu'il transmet à un neurone voisin par le biais de son axone (émetteur).

III.5.2.1 Neurone biologique

De point de vue biologique, un neurone biologique est constitué d'un corps cellulaire appelé soma, de plusieurs prolongements d'entrée de l'ordre de $0.01\mu\text{m}$ appelés **dendrites** et un prolongement de sortie appelé axone. A l'intérieur et autour du soma, on trouve des ions de sodium (Na^+), de calcium (Ca^{++}), de potassium (K^+) et de chlorure (Cl^-). Lorsque la membrane du soma est stimulée électriquement, elle permet le passage des ions tels que Na^+ et Ca^{++} . Ce qui change l'état interne du soma. [28]

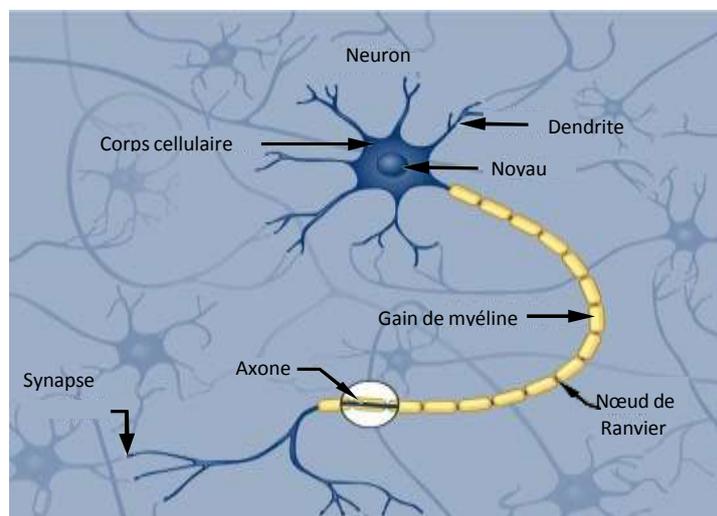


Figure. (III.11) : Modèle du neurone biologique

Durant notre jeunesse, de meilleures connexions s'établissent et les substances chimiques qui font les jonctions entre les neurones sont libérées en grande quantité. L'utilisation prolongée du cerveau fortifie les connexions et la capacité d'apprentissage augmente.

Le cerveau est constitué de plusieurs neurones. La sortie de chaque neurone est liée à des milliers d'autres neurones. Chaque neurone effectue un traitement local. Il collecte les signaux issus des dendrites et leur fait la somme. Si l'amplitude résultante dépasse un certain seuil interne, un signal est envoyé à travers l'axone vers d'autres neurones. Les interactions entre les neurones se font au niveau du corps cellulaire ou dans les dendrites à des points de jonction appelés synapses

III.5.2.3 Modèle d'un neurone artificiel

Le neurone formel est une modélisation mathématique qui reprend les principes de fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même valeur, les chercheurs ont créé un algorithme qui pondère la somme des entrées du neurone par des poids synaptiques (coefficients de pondération) [30].

Le résultat n de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert f qui produit la sortie a du neurone. Les R entrées du neurone correspondent au vecteur $p = [p_1 p_2 \dots p_R]^T$ alors que $w = [w_{1,1} w_{1,2} \dots w_{1,R}]^T$ représente le vecteur des poids du neurone.

La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R W_{1j} \cdot P_j - b \quad (\text{III.26})$$

On peut également l'écrire sous la forme matricielle

$$n = W^T \cdot p - b \quad (\text{III.27})$$

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins le biais b qui s'appelle aussi seuil d'activation. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil, alors l'argument de f devient positif (ou nul) ; sinon, il est négatif

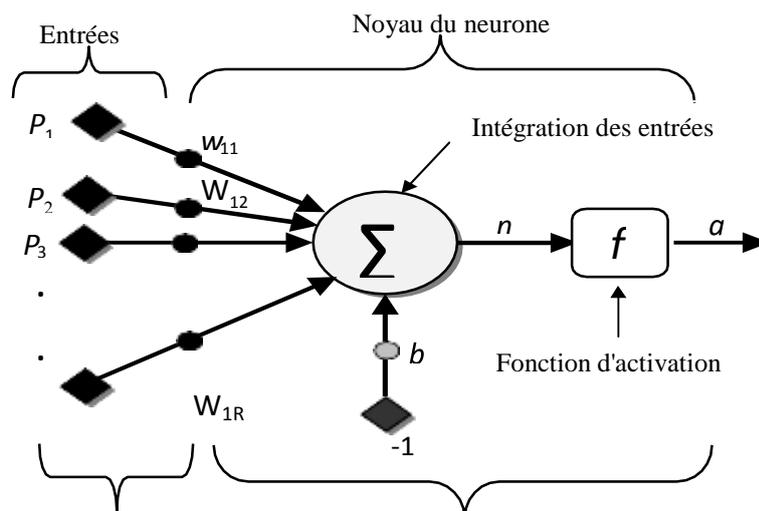


Figure (III.12) : Modèle d'un neurone artificiel

En ajoutant la fonction d'activation f pour obtenir la sortie du neurone, on obtient :

$$a = f(n) = f(W^T \cdot p - b) \quad (III.28)$$

En remplaçant w^T par une matrice $W=W^T$ d'une seule ligne, on obtient une forme générale :

$$a = f(W P - b) \quad (III.29)$$

L'équation précédente nous amène à l'élaboration d'un modèle plus compact par rapport à celui de la figure (III.12). On y représente les entrées « R » sous forme d'un rectangle d'où sort

le vecteur p qui est multiplié par une matrice W contenant les poids synaptiques. Finalement, la sortie du neurone est calculée par la fonction d'activation f .

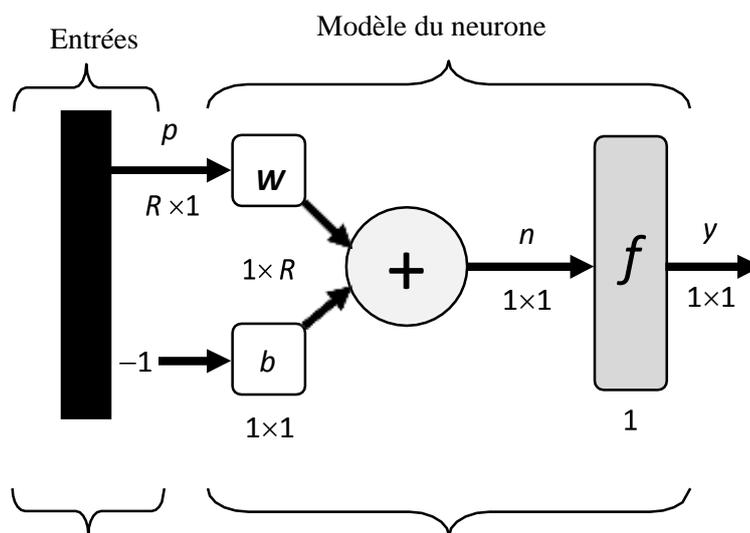


Figure (III.13) : Représentation matricielle d'un neurone artificiel

III.5.2.4 Fonction d'activation

Plusieurs fonctions d'activation peuvent être utilisées. Ce vaste choix de fonction permet aux modèles neuronaux de posséder des caractéristiques très variées. Cependant certaines fonctions les plus utilisées, telles que : [31]

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Icône	Nom MATALB
Seuil	$y = 0$ si $s < 0$ $y = 1$ si $s \geq 0$		Hardlim
Seuil symétrique	$y = -1$ si $s < 0$ $y = 1$ si $s \geq 0$		Hardlims
Linéaire	$y = s$		purelin
Linéaire saturée	$y = 0$ si $s \leq 0$ $y = s$ si $0 \leq s \leq 1$ $y = 1$ si $s \geq 1$		satlin
Linéaire saturée symétrique	$y = -1$ si $s < -1$ $y = s$ si $-1 \leq s \leq 1$ $y = 1$ si $s > 1$		satlins
Linéaire positive	$y = 0$ si $s \leq 0$ $y = s$ si $s \geq 0$		poslin
Sigmoïde	$y = \frac{1}{1 + \exp^{-s}}$		logsig
Tangente hyperbolique	$y = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$		tansig
Compétitive	$y = 1$ si s maximum $y = 0$ autrement	C	compet

Tableau (III.1) : Les différentes fonctions d'activation utilisées dans les RNA.

III.5.2.5 Composition d'un réseau de neurones

Un RNA est constitué généralement de trois couches, à savoir :

- **Une couche d'entrée** : Elle se compose de tous les neurones du réseau qui reçoivent les données du problème. Par conséquent, sa taille est directement déterminée par le nombre de variables d'entrée.

- **Une couche de sortie** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. c'est cette couche-là qui fournit les résultats du problème.

- **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles déterminent l'activité interne du réseau.

En général, les fonctions d'activation sont non linéaires sur ces couches

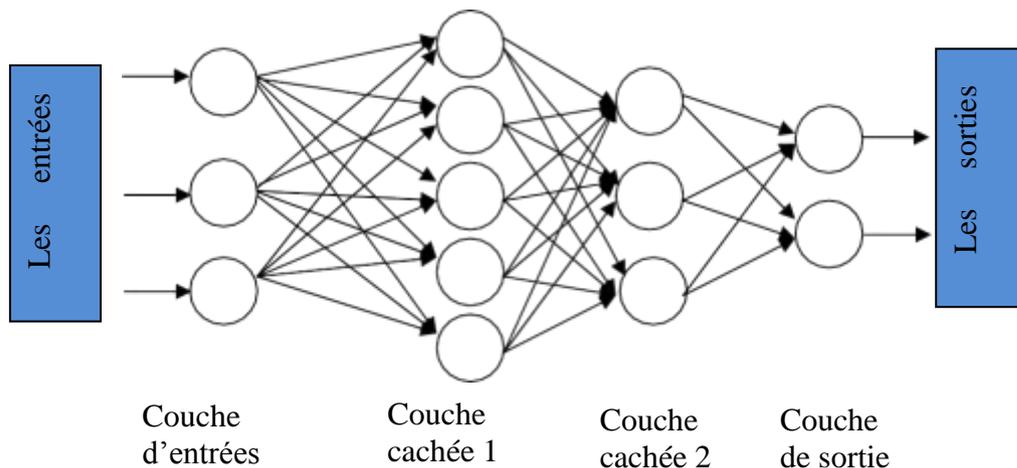


Figure (III.14) : Composition d'un réseau de neurones

III.5.2.6 Type de réseau de Neurones

a) Réseau de neurones bouclé

Les réseaux bouclés (ou récurrents ou encore dynamiques) permettent des connexions arbitraires entre les neurones de toutes les couches ; lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ. La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même ; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération. Il peut avoir plusieurs topologies [32]. Parmi les architectures de cette classe ; le réseau de neurones à mémoires (MNN) et le réseau neuronale récurrent à temps discret (DTRNN).

b) Réseau de neurones non bouclés

Un réseau de neurone non bouclé (dit aussi statique) est donc représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les

sorties sans « retour en arrière » ; c'est-à-dire à partir d'un neurone quelconque, en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ (figure (III.15))[31].

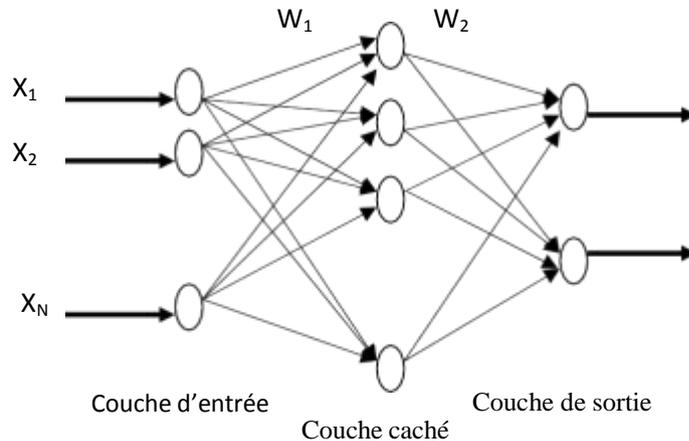


Figure (III.15) : Un réseau de neurone non bouclé

III.5.2.7 Apprentissage d'un réseau de neurones

L'information que peut acquérir un réseau de neurones est représentée dans les poids des connexions entre les neurones. L'apprentissage consiste donc à ajuster ces poids de telle façon que le réseau présente certains comportements désirés. En d'autres termes, l'apprentissage des réseaux de neurones consiste à ajuster les poids synaptiques de telle manière que les sorties du réseau soient aussi proches que possible des sorties désirées. Il existe deux types d'apprentissage:

- **L'apprentissage supervisé:** pour lequel on dispose de la sortie désirée et qui consiste à ajuster les poids synaptiques de telle sorte à minimiser l'écart entre la sortie désirée et la sortie du réseau,

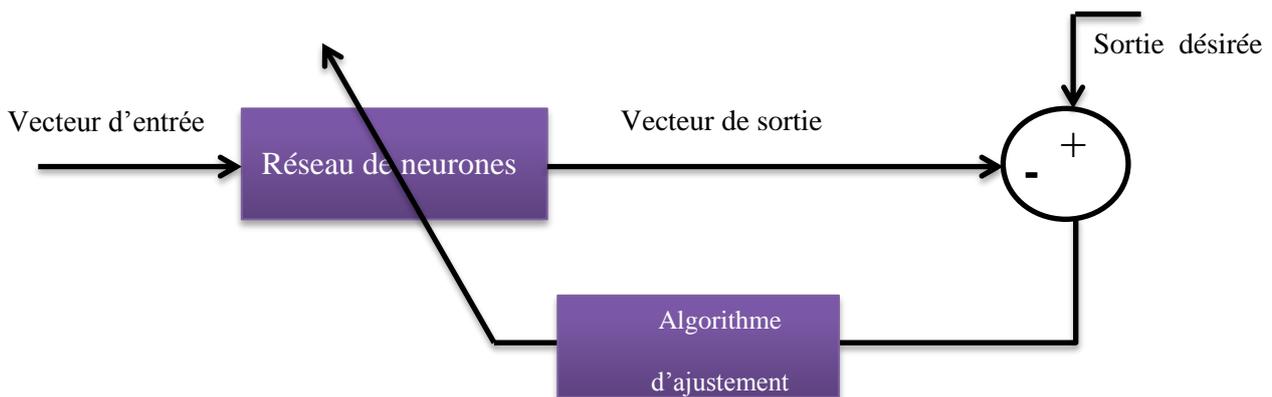


Figure (III.16) : Apprentissage supervisé.

- **L'apprentissage non supervisé**: pour lequel le réseau de neurones organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser un critère de performances donné, [33]

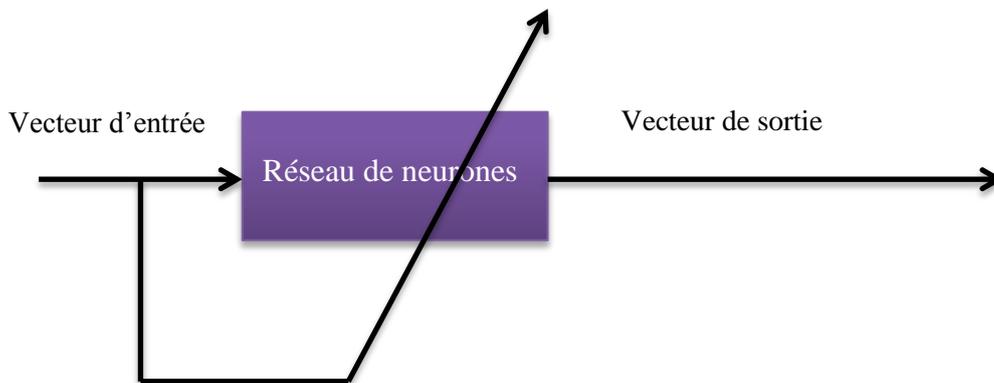


Figure (III.17) : Apprentissage non supervisé.

III.5.2.8 Algorithmes d'apprentissage du perceptron multicouche

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage du PMC ; l'un des plus utilisés est :

- L'algorithme de Levenberg - Marquardt

C'est un algorithme itératif de minimisation, qui appartient à la classe des méthodes quasi-Newtoniennes ; il obéit à la formule suivante de mise à jour des paramètres [34]:

$$W^{k+1} = w^k - [H(w^k) + \mu_{k+1}I]^{-1} \Delta E (w^k) \quad (\text{III.30})$$

Où :

$H(w^k)$: est la matrice Hessienne d'une fonction de coût appelée E .

I : est la matrice identité.

μ_{k+1} : est un scalaire appelé pas.

Pour de petites valeurs du pas μ_{k+1} , cette méthode s'approche de celle de Newton, tandis que pour de grandes valeurs du pas, la méthode tend vers celle du gradient simple. En choisissant judicieusement la valeur du pas au cours de l'algorithme, il est donc possible de

s'affranchir de la mise en œuvre préalable d'une méthode de gradient simple pour s'approcher du minimum.

Le calcul de l'inverse de la matrice $H(wk)+\mu k+II$ peut s'effectuer par des méthodes d'inversion directe. Néanmoins, compte tenu de la fonction de coût des moindres carrés E , il est préférable de mettre en œuvre une méthode d'inversion itérative.

III.5.2.9 Avantages et Inconvénients des réseaux de neurones

Avantages des réseaux de neurones

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe ;
- Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par « rétro propagation des erreurs ». L'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique ;
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données ;
- Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en mathématiques, informatique statistique requise ;
- Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données ;
- Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

Inconvénients des réseaux de neurones

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s) ;
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence ;
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation) ;
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur.[43]

III.5.2.10 Mise en œuvre des réseaux de neurones

Afin de tester les performances des réseaux de neurone dans le contrôle de puissance de notre machine, nous allons implémenter des blocs neuronaux permettant de calculer des termes adaptatifs qui vont agir sur notre système, en essayant de réduire au mieux les erreurs de suivi.

III.5.2.11 Choix des entrées/sorties du réseau de neurones

Notre système est découplé en deux sous-systèmes, on élabore le RNA en utilisant deux couples « entrée/sortie », à savoir :

- Système d : $p = [V_{ds2}; Q_{s1}]$, avec Δ_d comme vecteur cible.

- Système q : $p = [V_{qs2}; P_{s1}]$, avec Δ_q comme vecteur cible.

Où :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds2}}{dt} = \frac{1}{L_{s2}} (v_{ds2} - R_{s2}i_{ds2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_{s2}L_{s2}i_{qs2} - \omega_{s2}L_{m2}i_{qr}) \\ \frac{di_{qs2}}{dt} = \frac{1}{L_{s2}} (v_{qs2} - R_{s2}i_{qs2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s2}L_{s2}i_{ds2} + \omega_{s2}L_{m2}i_{dr}) \end{cases} \quad (III.31)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{ds2}}{dt} = \frac{v_{ds2}}{L_{s2}} + \frac{1}{L_{s2}} (-R_{s2}i_{ds2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_{s2}L_{s2}i_{qs2} - \omega_{s2}L_{m2}i_{qr}) \\ \frac{di_{qs2}}{dt} = \frac{v_{qs2}}{L_{s2}} + \frac{1}{L_{s2}} (-R_{s2}i_{qs2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s2}L_{s2}i_{ds2} + \omega_{s2}L_{m2}i_{dr}) \end{cases} \quad (III.32)$$

D'après l'équation (III. 31) et (III. 32) les expressions de Δ_d et Δ_q suivantes :

$$\begin{cases} \Delta_d = \frac{(-R_{s2}i_{ds2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_{s2}L_{s2}i_{qs2} - \omega_{s2}L_{m2}i_{qr})}{L_{s2}} \\ \Delta_q = \frac{(-R_{s2}i_{qs2} + L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s2}L_{s2}i_{ds2} + \omega_{s2}L_{m2}i_{dr})}{L_{s2}} \end{cases} \quad (III.33)$$

III.5.2.12 Choix du type de réseau de neurones

Parmi les différents types d'RNA disponibles, nous avons étudié le Perceptron multicouche non bouclé (PCM), qui s'est avéré très efficace ces dernières années.

Le PCM utilisé est constitué d'une seule couche cachée avec huit neurones, une fonction d'activation « sigmoïde tangente », et une seule couche de sortie avec un seul neurone avec une fonction d'activation « linéaire »

III.5.2.13 Choix de la stratégie d'apprentissage

L'apprentissage est un aspect très important des RNA qui consiste à modifier les poids des connexions jusqu'à ce qu'ils ne se modifient plus que d'une façon infime [34].

Lors de notre étude, nous avons adopté un apprentissage supervisé combiné à l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Le modèle du RNA utilisé dans cette étude est montré sur la figure suivante

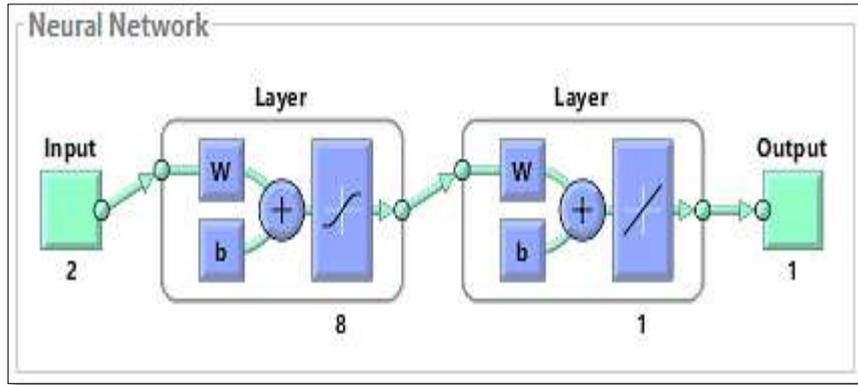


Figure (III.18) : Modèle du réseau de neurones utilisé.

III.5.2.14 Réalisation d'apprentissage

Lorsque le type de réseau de neurones sélectionné et la stratégie d'apprentissage déterminée, nous commençons à créer et à mettre en œuvre notre RNA.

Les figures suivantes montrent les performances de l'apprentissage effectué pour les deux sous-systèmes :

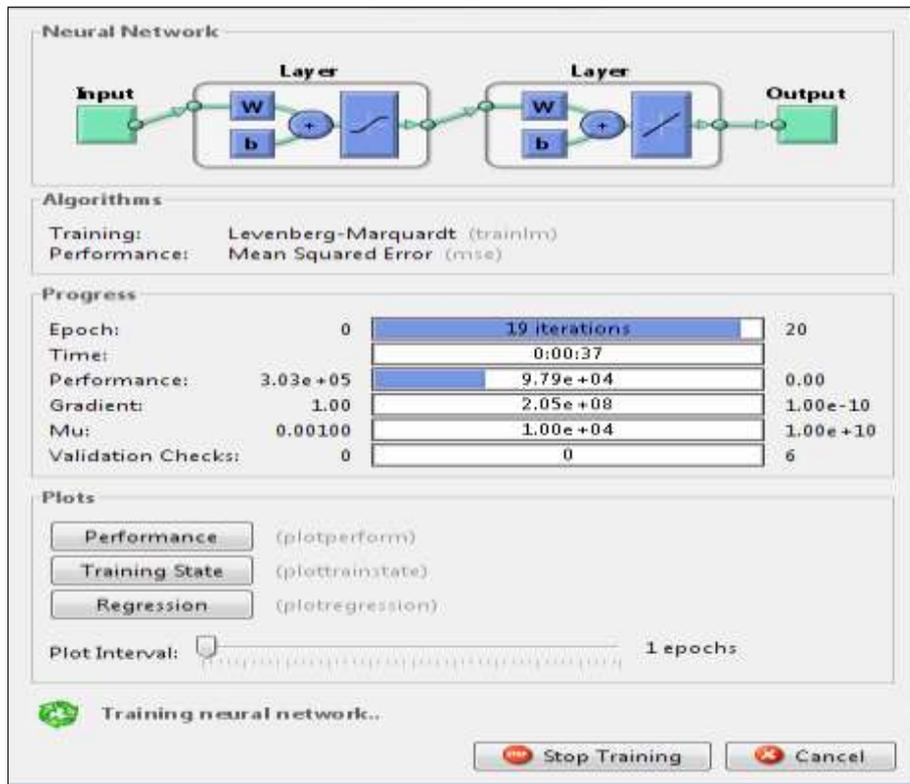


Figure (III.19) : Fenêtre d'entraînement de réseau de neurones

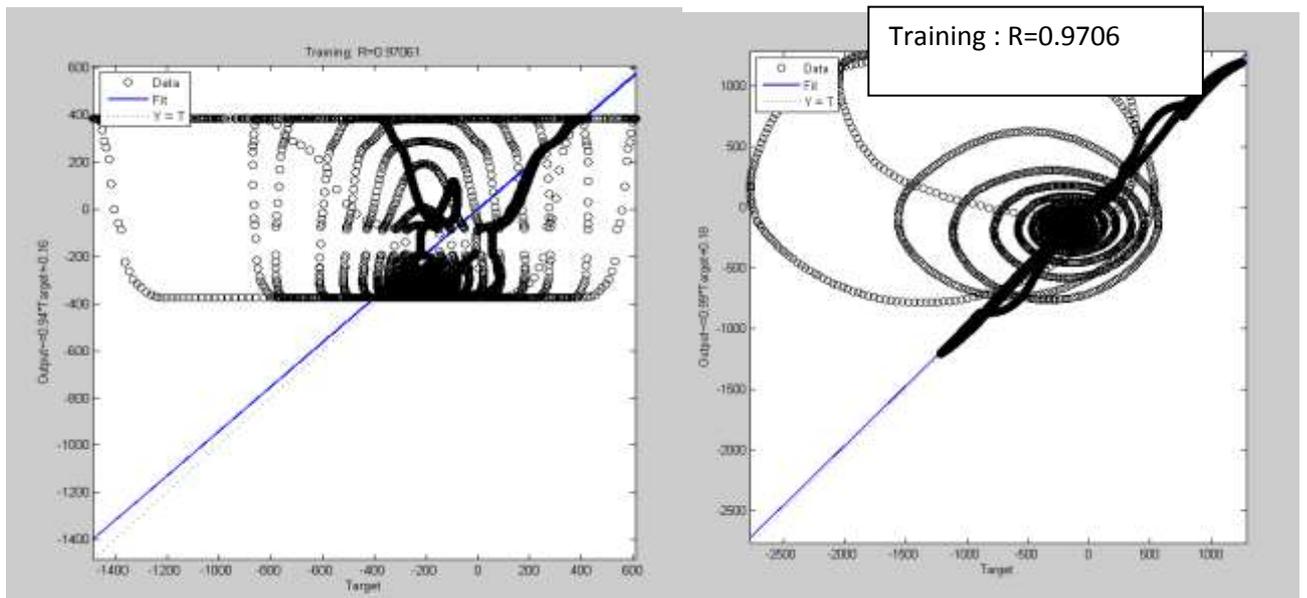


Figure (III.20) : Régression entre les sorties et les cibles (Targets).

III.5.2.14 Commande par réseaux de neurones avec régulateurs PI

Une fois la phase d'apprentissage réalisée, nous nous tournons vers l'implémentation sous Matlab/Simulink de deux blocs neuronaux permettant d'estimer les termes adaptatifs « Vad » et « Vaq » qui viseront à compenser les termes de perturbation Δd et Δq ciblés.

Ces termes adaptatifs sont calculés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} u_d^a = \hat{M}^T \sigma(N_0^T \mu_d) \\ u_q^a = \hat{M}^T \sigma(N_0^T \mu_q) \end{cases} \quad (III.34)$$

$$\begin{cases} \mu_d = [v_{ds2} \ q_{s1}]^T \\ \mu_q = [v_{qs2} \ p_{s1}]^T \end{cases} \quad (III.35)$$

Où \hat{M} est l'estimation de M qui est mise à jour selon la loi d'adaptation suivante :

$$\hat{M} = -F_{dq} [2(\sigma N_0^T \mu_{dq}) \tilde{i}_{dq} + k_{dq}(\hat{M} - M_0)] \quad (III.36)$$

Sachant que :

M_0 est la valeur initiale du vecteur poids de la couche de sortie.

N_0 est la valeur initiale du vecteur poids de la couche cachée.

$(\check{i}_{dq} = i_{dqr} - i_{dq})$ est l'erreur dynamique.

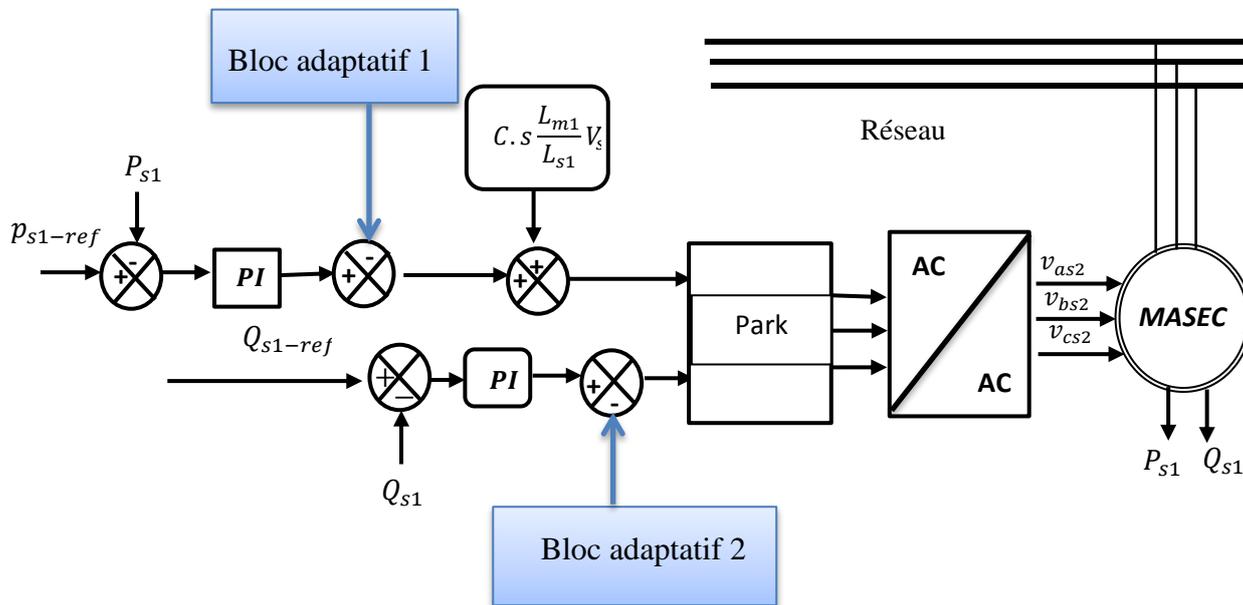


Figure (III.21) : Schéma du système de la commande neuronale

III.5.2.15 Résultats de simulation et interprétation

a) une variation de vitesse

En vue de vérifier les performances de la commande vectorielle mise en œuvre, nous allons élaborer deux tests, à savoir : sans et avec contraintes. Dans ce dernier cas, nous augmenterons les valeurs des résistances ainsi que celles des inductances propres au modèle de la MASEC.

On applique à la MASEC deux échelons de vitesse, l'un supérieur et l'autre inférieur à la vitesse du synchronisme. Les puissances de références actives $P_{s1}=1.5\text{Mw}$ entre [0-4s ;12-16s] et $P_{s1}=-1.5\text{Mw}$ entre [4-12s].

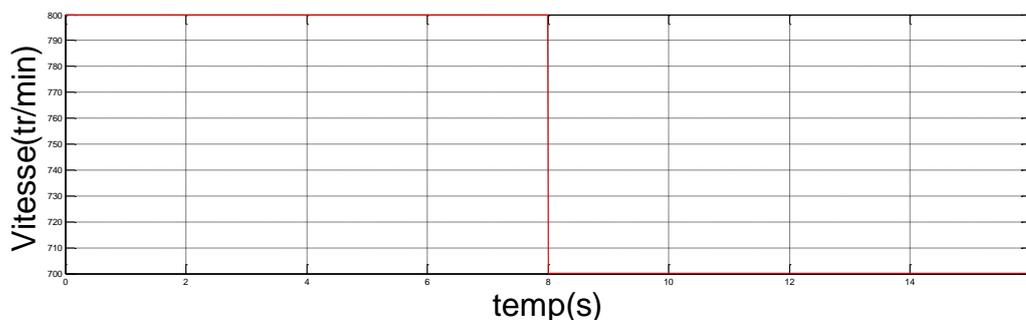


Figure (III.22) : vitesse de rotation de MASEC

Résultat de simulation et interprétation

Les conditions de simulations avec le contrôle par RNA étant les mêmes que dans la commande vectorielle direct par régulateur PI

1^{er} essai: Sans application des contraintes

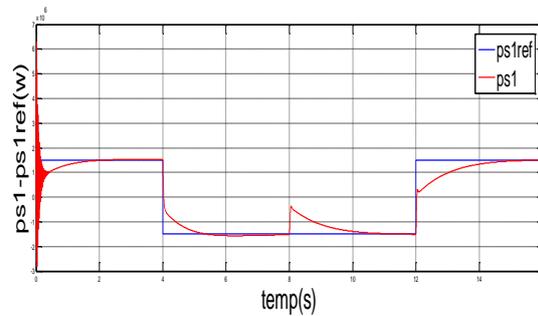
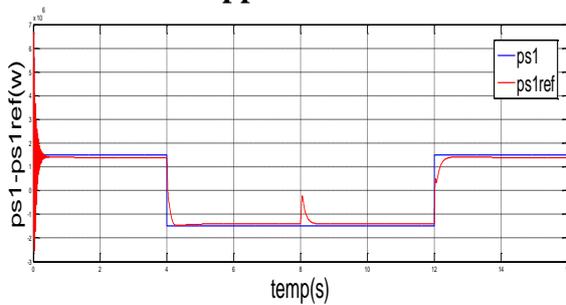


Figure (III.23) : puissance active 1 (RNA PI) Figure (III.24) : puissance active 1 (PI)

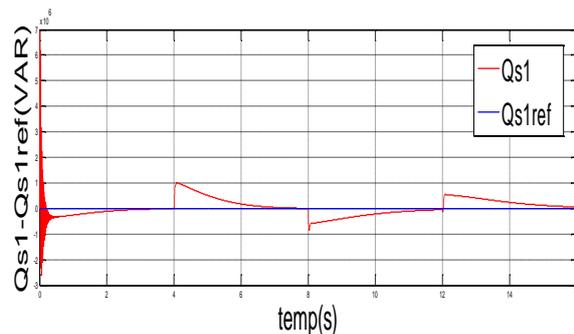
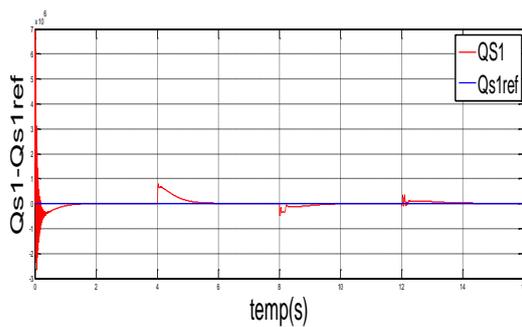


Figure (III.25) : puissance réactive 1(RNA PI) Figure (III.26) : puissance réactive 1 (PI)

On note que dans la commande avancé P_{s1} et Q_{s1} suivent le signal du référence de 98%
 Ces résultats montrent que le contrôle par réseau de neurone, apporte des améliorations remarquables par rapport aux régulateurs classiques PI. Un temps de réponse plus court et sans dépassement est insensible à la variation de vitesse

2^{ém} essai : avec application des contraintes

Afin d'étudier les variations des différentes grandeurs en fonction des contraintes appliquées, et en vue d'analyser les conditions extrêmes de fonctionnement, nous allons augmenter les résistances de 40% et les inductances de 20%

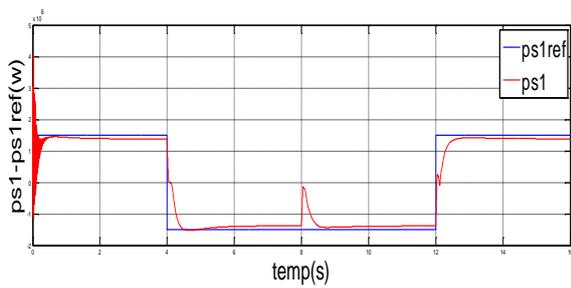


Figure (III.27) : puissance active 2 (RNA PI)

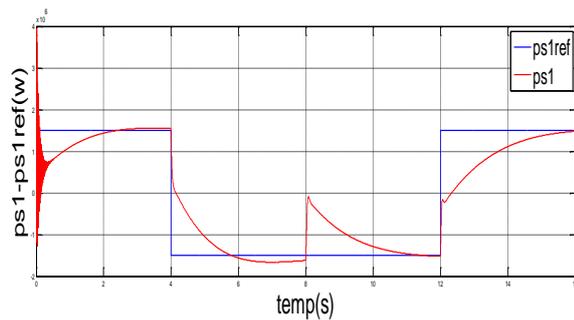


Figure (III.28) : puissance active 2 (PI)

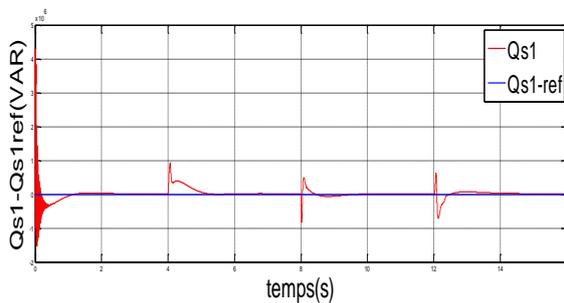


Figure (III.29) : puissance réactive 2 (RNA PI)

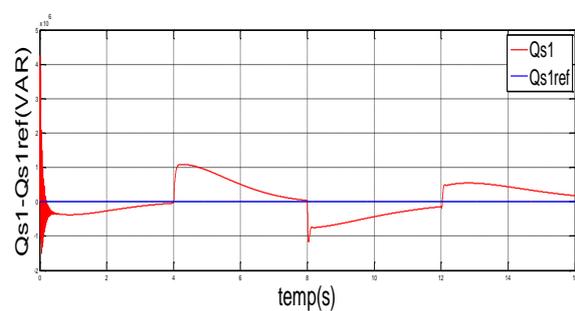


Figure (III.30) : puissance réactive 2 (PI)

Après l'application des contraintes on remarque que le contrôle par réseau de neurone toujours donne un bon résultat, il est insensible à la perturbation et les variations de vitesse par contre le contrôle conventionnel est sensible à la perturbation

b) Insertion de la MASEC dans l'éolien

On connecte le rotor de MASEC avec la turbine éolien, et nous prenons la puissance mécanique de la turbine comme référence pour la puissance active (P_{s1}) de la MASEC

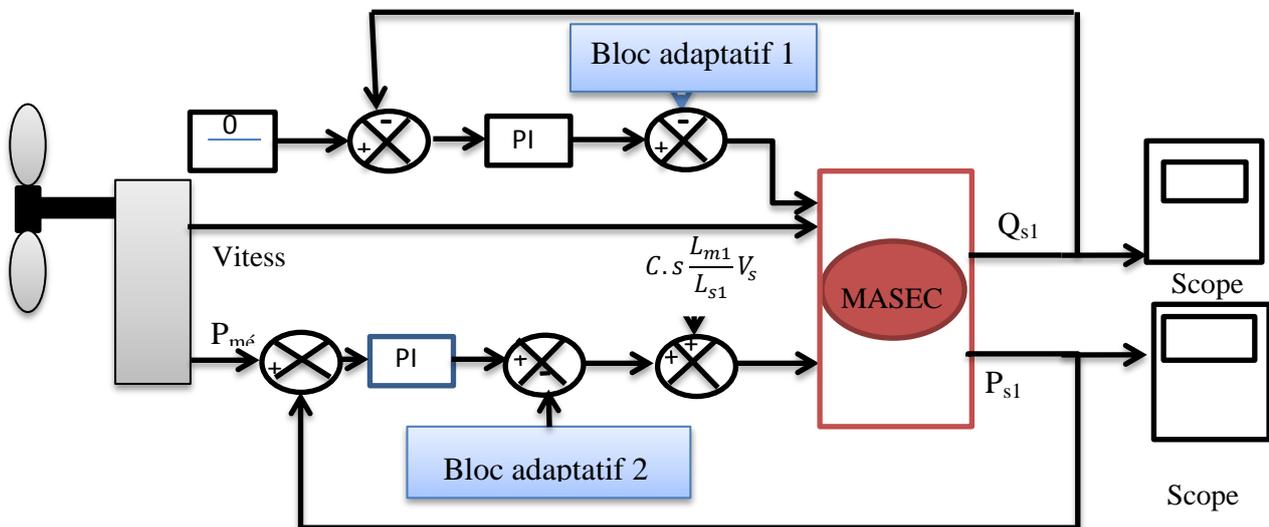
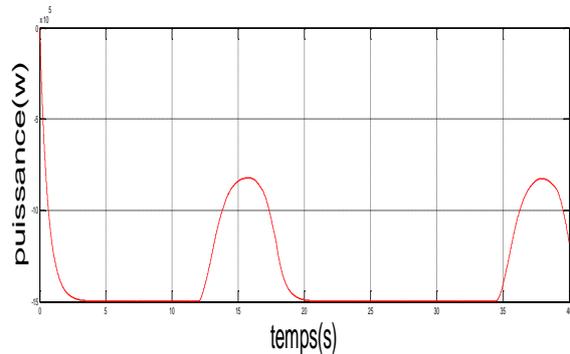
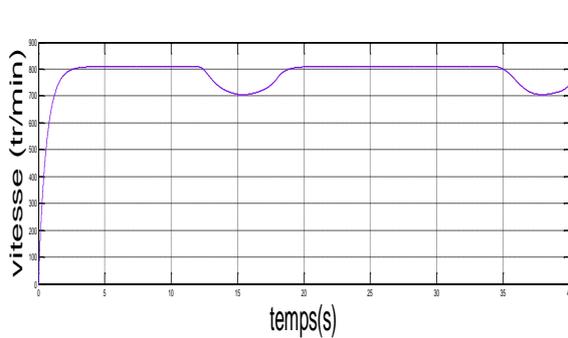


Figure (III.31) : Schéma du système avec la dynamique



Figure(III.32) : Vitesse de rotation de la turbine

figure(III.33) : puissance mécanique

1^{er} essai: Sans application des contraintes

Les paramètres de la machine sont idéals

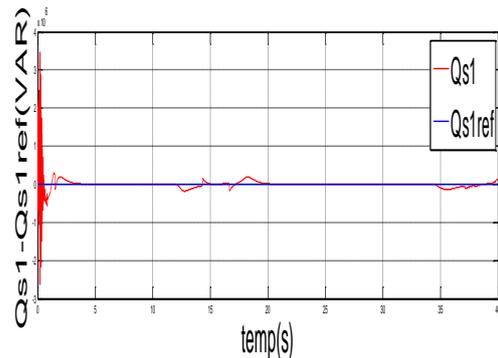
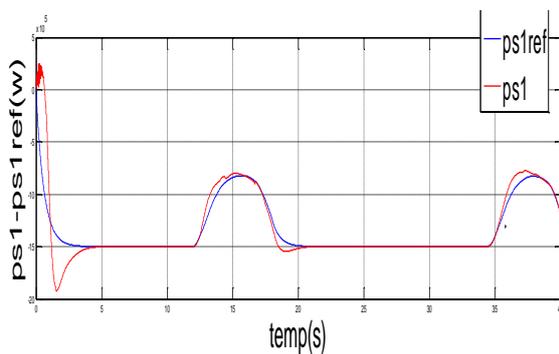


Figure (III.34) : puissance active 1

Figure (III.35) : puissance réactif 1

On remarque la puissance active et négative pour toute la phase de temps donc la machine est toujours génératrice.

Les puissances active et réactive suivent le signal de référence de 98%

2^{ème} essai : avec application des contraintes

Afin d'étudier les variations des différentes grandeurs en fonction des contraintes appliquées, et en vue d'analyser les conditions extrêmes de fonctionnement, nous allons augmenter les résistances de 40% et les inductances de 20%

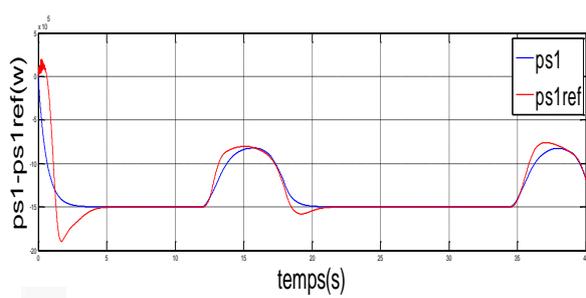


Figure (III.36) : puissance active 2

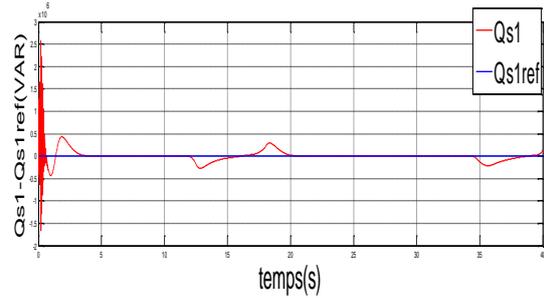


Figure (III.37) : puissance réactive 2

Les puissances active et réactive suivent le signal de référence malgré les perturbations et la variation de la vitesse de rotation

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la commande de la MASEC. La puissance du stator 1 est commandée par la tension de stator 2.

Après les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons conclure que le contrôle artificiel (basé sur le réseau de neurone) peut améliorer la commande conventionnelle (basé sur un régulateur PI) en termes de précision et de réponse aux changements de vitesse de rotation Et qu'il peut affronter les perturbations qui affectent le système.

Conclusion générale

Le but de ce mémoire est la commande de la machine asynchrone en cascade, intégré dans un système éolien de puissance 1.5 MW. Nous avons appliqué deux commandes à la MASEC, l'un d'eux est le contrôle vectoriel classique avec régulateur PI, et l'autre est le contrôle intelligent via un réseau de neurones artificielle, nous avons trouvé que la commande neuronale améliorerait la commande vectorielle du côté de la performance et de la robustesse

Le premier chapitre est consacré à la classification des machines électrique selon le type de courant (alternative ou continue), nous avons remarqué les machines de grand puissance sont des machines de type alternative

Le deuxième chapitre contient la modélisation de la chaîne de conversion, la MADA puis la MASEC et la représentation des modèles sur le repère (d,q) avec la simulation sur MATLAB-SIMULINK. D'après les résultats on peut conclure que la vitesse synchronisme de la MADA égale à deux fois la vitesse synchronisme de la MASEC (couplage d'un deux MADA augmente le nombre de pôles de pôle donc diminution de la vitesse de synchronisme)

Le dernier chapitre étudie le contrôle de puissance de la MASEC avec des régulateurs classiques PI et avec un réseau de neurone artificielle, on remarque qu'on peut améliorer la poursuite de référence et la robustesse de commande vectorielle grâce à des blocs adaptatifs basés sur des réseaux de neurone artificielle

D'après l'étude effectuée dans ce travail on peut conclure que la MASEC représente une bonne candidate pour remplacer la MADA dans divers domaines car elle présente beaucoup d'avantages.

Annexes

➤ Paramètres de la MASEC

Les Paramètres de la MASEC sont donnés par le tableau suivant [10] :

Paramètres de la MASEC	Valeur
P_{s1}, P_{s2}	1.5 (MW)
u_n	690 (V)
R_{s1}, R_{s2}	0.012 (Ω)
R_{r1}, R_{r2}	0.021 (Ω)
L_{s1}, L_{s2}	0.0137 (H)
L_{r1}, L_{r2}	0.0137 (H)
L_{m1}, L_{m2}	0.0135 (H)
J_1, J_2	50 ($kg.m^2$)
f_1, f_2	0.0071 ($Nm.\frac{s}{rad}$)
p_1, p_2	2

Tableau (I) : Paramètres de la MASEC.

➤ Paramètres de la turbine

Les paramètres de la turbine liée à la MASEC sont donnés par le tableau suivant [10] :

paramètres de la turbine	Valeur
Puissance nominale	1.5 (MW)
Nombre de pales	3
Hauteur du mat	85 m
Rayon de la turbine	$R = 36 m$
Gain du multiplicateur de vitesse	$G = 40$

Tableau (II) : Paramètres de la turbine utilisée

Bibliographie

- [1] **F. Poitiers**, « Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'Utilisation de L'Energie Eolienne », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [2] **N. Hamdi**, « Amélioration des performances des aérogénérateurs », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, Option : Modélisation et commande des machines électriques, Constantine, Algérie, 2013
- [3] **R. Abdessemed** « livre ,Modélisation et simulation des machines électrique ,2011,éditeur Ellipses »
- [4] **E. Gaucheron**, « Les moteurs électriques - pour mieux les piloter et les protéger ». Cahier Technique Schneider Electric n° 207, (2004).
- [5] **A. Bensayah** «Contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu» Mémoire de fin d'études. Université LARBI BEN M'HIDI – OUM EL BOUAGHI 2016
- [6] **R. Bousseksou**, « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic ». Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine, (2007).
- [7] **Z. Tamindjout**, A. TOUATI, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ». Mémoire de fin d'études. Université A. Mira de Bejaia, (2017).
- [8] **Kh. El Khil. S**, «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée L. MADI, B. KHETTAL, « Contrôle par la logique flux d'une machine asynchrone en cascade ». Mémoire de fin d'études. Université A. Mira de Bejaia, (2013).
- [9] **S. A. M. Ardjoun** « Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Mémoire de magister, Université D. Liabes de Sidi-Bel- Abbès, (2010).
- [10] **A. Maafa**, « Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence ». Mémoire de magister. Université El Hadj Lakhdar de Batna, (2011).
- [11] **A. Maafa**, « Intégration d'une cascade de deux machines asynchrones dans un système éolien ». Thèse de doctorat. Université A. Mira de Bejaïa, (2017).
- [12] **L. Madi, B. KHettal**, « Contrôle par la logique flux d'une machine asynchrone en cascade ». Mémoire de fin d'études. Université A. Mira de Bejaia, (2013).
- [13] **F. Milsant**, Machines électriques, Editions MARKETING décembre 1991.

- [14] **B. Multon**, « Principe et éléments de dimensionnement des machines à réluctance »
- [15] **Y. Liao**, T.A. Lipo, « A New Doubly-Salient Permanent Magnet Motor For Adjustable Speed Drives », SPEEDAM Conf. (Positano, Italy), May 19-21, 1992, pp. 415-420.
- [16] **Y. Liao**, F. Liang, T.A. Lipo, « A Novel Permanent Magnet Motor with Doubly Salient Structure », IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.31,NO.5, September/October 1995
- [17] **G. Pongo nyoumea**, « MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS ». Mémoire de fin d'études. Université QUÉBEC EN ABITIBI-TEMISCAMINGUE (2008)
- [18] **F. Dione**, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Master, Université d'Annaba, Juin 2018
- [19] **W. Benemmagh**, « Commande de la machine asynchrone par la cascade hyposynchrone à base des logiciel SIMPLOREER et MATLAB ». Mémoire de magister. Université de Sétif 1, (2013).
- [20] **H. Amimeur**, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement ». Mémoire de magister. Université Hadj Lakhdar de Batna, (2008).
- [21] **M. A. Mahboub** « Modélisation et commande d'un system éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Sétif, (2012).
- [22] **A.Maafa, D. Aouzella, K.ghedamsi, R.Abdessemed** , « Study of the cascade doublyfed induction machine (CDFIM) ” International conference on electrical, electronics and automatic 10, University of Bejaia, 02-03 November .Algeria, (2010).
- [23] **C. CHEvassu**, « Machines électriques ». Cours et problèmes. Ecole nationale supérieur Maritime, (2012).
- [24] **L. Allali**, « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », Mémoire de fin d'étude en génie électrique, Université de Ain el Beida, 04/06/2016.
- [25] **A. Boulahia**, « Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique », Mémoire de Magister, option : Modélisation et Commande des Machines électriques, Université de Constantine, 2009
- [26] **S. El-Aimani** « Modélisation de différentes technologies intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. EcoleCentrale de Lille (ECL). 2005.
- [27] **Z. Tir**, « Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade ». Mémoire de

magister. Université Ferhat Abbas de Sétif, (2010).

[28] **B. Dehiba, A. Meroufel, A. Bendaoud, M. B. Benabdellah**, « Commande en vitesse par mode de glissement d'un moteur asynchrone avec limitation du courant par poursuite d'une surface de commutation ». ACTA Electrotehnica, Volume 48, pp194-200, Number 3, (2007).

[29] **C. Touzet** ; « LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS », INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME, COURS, EXERCICES ET TRAVAUX PRATIQUES, Juillet 1992, pp24.

[30] **T. Merzougui et K.Abdelkebir**, « Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) », Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2019.

[31] **P. K. Simpson** «Artificial neural systems », Pergmon Press Elmsford, New York. 1989.

[32] **N. Benahmed**. « Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés : sélection et pondération des primitives par algorithmes génétiques », Mémoire de Maîtrise, Ecole de Technologie Supérieure Montréal, Mars 2002.

[33] **K.Saoudi** . « support de cours ,: technique d'intelligence artificielle ,Réseaux de neurones », université de bouira 2020 /2021.

[34] **A. Bouchaala**, « Commande de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) par les réseaux de neurones artificiels », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2019

Résumé générale

La cascade est équivalente au couplage de deux machines asynchrones électriquement et mécaniquement via leurs rotors, ce couplage permet d'éliminer le contact glissant bagues-balais, le but de ce mémoire et appliqué une commande robuste et fiable pour contrôlé la puissance de la MASEC

On peut améliorer la commande vectorielle par un réseau de neurone artificielle
Les résultats obtenus avec le contrôle par réseau de neurone artificiel expriment une rejection des perturbations de puissance générée par la machine asynchrone en cascade intégrée dans un système éolien.

Mots clés : cascade de deux machines asynchrone, réseau de neurones

ملخص

الألة التي دارسناها تعادل اقتران التين لا تزاميتين كهربائيا و ميكانيكا عبر دورتهما، وهذا الاقتران يزيل التلامس الدائري المنزلق

الغرض من هذا العمل هو تطبيق تحكم قوي و موثوق للتحكم بطاقة هذه الألة لتحسين التحكم بإضافة تحكم ذكي المتمثل في شبكة عصبية اصطناعية

النتائج المتحصل عليها من خلال الذكي تعبر عن نقص في اضطرابات الطاقة الناتجة عن آلة التتابع غير المتزامن المدمج في نضام طاقة الرياح

Abstract

The cascade is equivalent to the coupling of two asynchronous machines electrically and mechanically via their rotors, this coupling eliminates the sliding ring-brush contact, the purpose of this brief and applied a robust and reliable control to control the power of the MASEC

We can improve vector control by an artificial neuron network
The results obtained with the control by artificial neuron network express a rejection of the disturbances of power generated by the asynchronous cascading machine integrated in a wind power system.

Key words: cascade doubly fed induction, Artificial Neural Networks (RNAs).