

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° :



DOMAINE : Génie électrique
FILIERE : Electrotechnique
OPTION : Réseaux électrique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

Commande d'une génératrice synchrone à
aimant permanent (GSAP)

Proposé et dirigé par :

Pr.MESSALTI Sabir

Dr.ZEMMIT .Abderrahim

Présenté par :

MERZOUGUI Theldja

ABDELKEBIR Khedidja

Soutenu devant le jury composé de :

CHOUCHOU Abdelmajid	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
MESSALTI Sabir	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
ZEMMIT.Abderrahim	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
BELHOUCHETKhaled	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2018/2019

Remerciements

Avant tout, on remercie le dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

On tient à remercier notre encadreur MESSALTI S, ZEMMITA ET AZOUZ .S pour ses conseils pertinents et éclairés, son aides étaient pour nous d'une importance capital dans la réalisation et à la réussite de ce travail.

On exprime nos profonds remerciements à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail ainsi qu'à tous les enseignants du département génie électrique.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leurs soutiens inconditionnels tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chères parents fatma.abdelkader ,qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mes frères

A ma chère soeur,

A tous mes amis.

A tous mes camarades de la promotion réseaux électriques 2018/2019.

THELDJA

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études, ainsi pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis;

A mon frère

A mes sœurs

A tout ma famille.

A mes amies et mes collègues A mes professeurs de

A tous mes camarades de la promotion réseaux électriques 2018/2019.

Khedidja

SOMMAIRE**CHAPITRE I****Généralité sur génératrice synchrones à aimants permanents**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralité sur machines synchrones a aimants permanents (MSAP).....	4
I.2.1 constitution de la machine synchrone a aimant permanent(MSAP)	4
I.3 principe de fonctionnement de la MSAP.....	6
I.4 types des machines synchrones.....	6
I.4.1. machines a pôles lisses	6
I.4.2. machine a pôles saillants	7
I.5 différentes types de machines a aimants.....	7
I.5.1 machines a flux radial	7
I.5.2 machines aflux axial.....	8
I.5.2.1 machines a flux axial a un stator et un rotor.....	8
I.5.2.3 machines a flux axial a stator multiples ou multi disques.....	10
I.6 les aimants permanents.....	10
I.6.1 définition des aimants permanents.....	10
I.6.2 matériaux pour aimants.....	11
I.7 catégories de la MSAP.....	12
I.8.1 les avantages et les inconvénients de la MSAP.....	14
I.8.1 les avantages	14
I.8.2 les inconvénients	14
I.9 les domaines d'application de MSAP.....	15
I.10 fonctionnement da la machine synchrone a aimant permanent (MSAP).....	15
I.11 Conclusion.....	16

CHAPITRE II:**Modélisation et simulation de la GSAP**

II.1 introduction.....	17
II.2 Description.....	17
II.3 principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone.....	18
II.4 modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent	18
II.4.1 hypothèses simplificatrices	19
II.4.2 équationsélectriques de la GSAP.....	20

II.4.3 passage au repère de Park.....	20
II.4.4 équations magnétiques.....	23
II.4.5 expression du couple électromagnétiques.....	23
II.4.6 équations mécaniques.....	24
II.5 Simulation de la GSAP.....	24
II.5.1 GSAPvide.....	24
II.5.1.1 résultats de simulation	24
II.5.2 GSAP en charge séparée (R_{ch}, L_{ch}).....	25
II.5.2.1 équations d'état.....	26
II.5.2.2 simulation de GSAP en charge.....	27
II.5.2.3 résultats de simulation	27
II.5.2.4 remarque.....	28
conclusion	29
CHAPITRE III : commande vectoriel de la GSAP	
III.1 introduction	30
III.2 Energie éolienne.....	30
III.3 commande vectoriel de la GSAP.....	31
III.3.1 Principe de la la commande vectorielle.....	31
III.3.2 Synthèse des correcteurs	33
III.4 Structure complète de contrôle vectoriel de GSAP	35
III.5 Avantage de et inconvénient de la commande vectorielle	35
III.5 .1 Avantage.....	35
III.5 .2 inconvénient.....	35
III.5 Simulation de la commande vectoriel de GSAP	36
III .5.1 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est constant	36
résultats de simulation	36
III .6.2 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est constant	38
.résultat de simulation	38
Conclusion	41
CHAPITRE IV :	
Commande vectoriel par réseaux de neurone	
IV.1 introduction	42

IV.2. notions sur les réseaux de neurones artificiels.....	42
IV.2.1 historique.....	42
IV.2.2 objectifs de la commande par les RNA	43
IV.2.2 le modèle neurophysiologique (neurone biologique)	43
IV.2.3 neurone formel	44
IV.2.3.1 présentation mathématique	45
IV.2.3.2 fonction d'activation	46
IV .2 .3 les réseaux de neurones artificiels	48
IV .2 .3.1 définition	48
IV .2 .4 architecture des réseaux de neurones	48
IV.2.4.1 les réseaux non bouclés	49
IV.2.4.2 réseaux bouclée	49
IV.2.5 l'apprentissage des réseaux de neurones	50
IV.2.5.1 apprentissage supervisé	51
IV.2.5.2 apprentissage non supervisé.....	51
IV.2.6 les principales règles d'apprentissage	51
IV.2.7 application des réseaux de neurones	53
IV.2.8 avantages et inconvénients des réseaux de neurones	54
IV.2.8.1. avantages des réseaux de neurones	54
IV 3.2. inconvénients des réseaux de neurones	54
IV.3 contrôle vectoriel de GSAP par RNA	54
IV.3.1 structure complète de contrôle vectoriel de GSAP par RNA	56
IV.3.2 Résultats de simulation de la commande par RNA	56
IV.3.2.1 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est constant.....	56
IV.3.2.2 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est variable.....	56
IV.5 Comparaison entre deux commandes.....	61
IV.6 Conclusion	61

INDEX DES NOTATIONS

GSAP	Génératrice Synchrones à aimant permanent.
MSAP	Machine Synchrones à aimants Permanent.
MSAPS	Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.
MSAPI	Machines synchrones à aimants permanents insérés.
MSAPC	Machines synchrones à aimants permanents chapeautés.
MSAPE	Machines synchrones à aimants permanents enterrés.
f-é-m	force électromotrice.
E_0	La force électromotrice
R_s	la résistance des phases statoriques
$v_a \ v_b \ v_c$	les tension de phases statoriques.
$i_a \ i_b \ i_c$	les courant de phases statoriques.
$\psi_a \ \psi_b \ \psi_c :$	les flux totaux traversant les bobines statoriques.
$V_d V_q$	composantes directe et en quadrature de tension.
(d, q)	Indice du repère de Park lié au rotor.
$I_d I_q$	composantes directe et en quadrature de courant.
$\psi_d \psi_q$	composantes directe et en quadrature du flux.
$L_d \ L_q$	sont les inductances directe et en quadrature.
L_s	l' inductance des phase statorique.
I_s	le courant de phase statorique.
V_s	la tension de phase statorique.
ψ_s	Le flux des phase statorique.
ψ_f	le flux d'excitation des aimants.
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor.
$\Omega_{réf}$	Vitesse de rotation mécanique du rotor référence
ω	Pulsation électrique statorique.
p	le nombre de paires de pôles.
$e_d ; e_q$	les composantes directe et en quadrature de f.e.m.
Cem	Le couple électromagnétique.

W_e	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.
θ_{geo}	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
C_m	Le couple moteur appliqué sur la génératrice.
$f \Omega$	Le couple de frottement.
J	moment d'inertie total de la machine.
f	coefficient de frottement visqueux.
R_{ch}	la résistance de charge.
L_{ch}	inductances de charge.
T_e	la constante de temps électrique.
I_{d-ref}	le courant direct référence.
I_{q-ref}	le courant quadrature référence.
C_{em-ref}	Le couple électromagnétique référence.
T_f	la constante de temps.
T_0	la constante de temps électrique.
PI	régulateur proportionnel intégrateur
k_{cp}	Gain proportionnel de la boucle de régulation de courant.
k_{ci}	Gain intégral de la boucle de régulation de courant.
V_{d-ref}	La tension direct référence.
V_{q-ref}	La tension quadrature référence.
RNA	réseaux de neurones artificielles
f	fonction d'activation
x_i	les entrées du réseau
v	le potentiel d'activation
w_{nj}	les poids synaptiques
y_i	la sortie du réseau
a	le pas d'adaptation
$f_j f_i$	fonctions d'activations
$S_j S_i$	valeurs d'activations

LISTE DE FIGURE**CHAPITRE 1**

Figure I.1: Différents types de rotors d'une MSAP.

Figure I.2: Rotor à pôles lisses.

Figure I.3: Rotor à pôles saillants

Figure I.4: Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur.

Figure I.5: Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur.

Figure I.6: Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.

Figure I.7: Descriptif de la machine à flux axial stator externe..

Figure I.8: Descriptif de la machine à flux axial stator interne.

Figure I.9 : Descriptif de la machine à flux axial multi Niveaux.

Figure I.10: Machine à flux axial multi Niveaux.

Figure I.11: Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.

Figure I.12 : Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.

Figure I.13: Machines synchrones à aimants permanents insérés.

Figure I.14: Machines synchrones à aimants permanents chapeautés.

Figure I.15: Machines synchrones à aimants permanents enterrés.

CHAPITRE II

Figure II.1 : Schéma représentatif de la GSAP .

Figure II.2 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

Figure II.3 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

Figure II.4: Modèle de PARK pour la GSAP.

Figure II.5: Résultat de simulation de GSAP à vide.

Figure II.6: Bloc de simulation de la GSAP en charge.

Figure II.7: GSAP sur une charge séparée

CHAPITRE III

Figure III.1 : Boucle de régulation de courant

Figure III.2 : stratégies de commande en couple de GSAP

Figure III-3: Schéma complet de commande vectorielle de GSAP

Figure III.4 : GSAP a vitesse constante

Figure III.5 : simulation de GSAP a vitesse variable

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Représentation schématique d'un neurone biologique.

Figure IV.2 Modèle d'un neurone formel

Figure IV.3: Exemple fonctions de transfert

Figure IV.4 perceptron monocouche

Figure IV.5 : perceptron multicouche.

Figure IV.6 : Réseau bouclé

Figure IV.7 : Modèle d'apprentissage de la connexion W_{ij} entre deux neurones

Figure IV.8 : Boucle de régulation de courant

Figure IV.9 : stratégies de commande en couple de GSAP

Figure IV.10: Schéma complet de commande vectorielle de GSAP par RNA

Figure IV.11 : Résultat de simulation GSAP a vitesse de vent constante

Figure IV.12 : résultat de simulation GSAP a vitesse de vent variable

Introduction générale

Aujourd'hui, les machines synchrones constituent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie, couvrent une très large gamme d'énergie .

Les machines synchrones étaient principalement utilisées pour produire de l'énergie électrique à partir de sources mécaniques provenant de différentes sources, sous la forme de générateurs fonctionnant dans une gamme de puissance allant de quelques watts à quelques centaines de mégawatts.

Les génératrices synchrones aimant permanentes, prennent de plus en plus dominant par rapport aux autres machines électriques. Ces types de machines peuvent extraire un maximum d'énergie en minimisant, contraintes mécaniques, en éliminant le multiplicateur de vitesse, ce qui améliore fiabilité du système et coûts de maintenance réduits.

Les Différents types de génératrices peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique .

L'énergie de vent est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Le vent est une énergie naturelle capable de générer de l'électricité ou de l'énergie mécanique . Le vent tourne les pales Qui est lui-même couplé avec rotor et générateur. Quand le vent est assez fort (Au moins 15 km / h), les pales tournent et le générateur produit de l'électricité.

La commande vectorielle permet d'avoir une dynamique proche de la dynamique du continu, autrement dit une dynamique linéaire, intermittente et discrète. Cependant, cette structure de contrôle nécessite que les paramètres de la machine soient précis. Cela nécessite une bonne définition des paramètres. En conséquence, Utiliser des algorithmes de contrôle robuste pour maintenir une séparation et des performances acceptables.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur les machines synchrones a aimant permanent, son utilisation, sa constitution, enfin son fonctionnement.

Dans la deuxième chapitre, nous allons présente la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanent (GSAP) dans le plan de Park. sont simulés et analyses.

Le troisième chapitre montre la commande de GSAP par la commande vectorielle, on utilise un régulateur de type PI.

Dans le chapitre quatre, nous exposons la commande de la GSAP par les réseaux de neurone, à la fin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale regroupant les différents résultats obtenus et quelques perspectives pour compléter ce travail.

Chapitre I :

Généralité sur les machines synchrones a aimant permanant

I. Introduction

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

Les machines synchrones étaient principalement utilisées pour produire de l'énergie électrique à partir de sources mécaniques provenant de différentes sources, sous la forme de générateurs fonctionnant dans une gamme de puissance allant de quelques watts à quelques centaines de mégawatts[1].

Il y a deux évolutions technologiques. À partir des années 1950-1960, initiées depuis quelques années, allaient effectivement s'appliquer dans le domaine des machines électriques et modifier progressivement et inéluctablement cette classification. :

La première évolution concerne le développement des semi-conducteurs de puissance qui autorisait la mise au point de convertisseurs statiques permettant d'alimenter les machines à fréquence variable quelque soit la nature et les caractéristiques de la source de puissance électrique.

La seconde évolution était relative à l'apparition sur le marché d'aimants permanents performants capable de résister à la désaimantation des champs de réactions d'induit présents dans les machines électriques et possédant des inductions rémanentes suffisantes.

Le développement de l'aimant permanent sous la forme d'alliages de métaux rares ou de sols (type Manico, frottis de cobalt ou fer néodyme, etc.) à utiliser comme catalyseur dans des machines synchrones offrant de nombreux avantages: induction à haute saturation, faible magnétisme, masse volumique élevée, La plus grande énergie stockée d'autres types de machines, [2-3].

Dans ce chapitre on va essayer de donner des généralités sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) son utilisation, sa constitution, enfin son fonctionnement.

I.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

Une machine synchrone est une machine électrique qui :

- soit produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement « génératrice » dans deux quadrants du plan couple –vitesse. l’alternateur est une application particulière de la machine synchrone, fonctionnant en génératrice dans un seul quadrant du plan couple – vitesse.
- soit absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement « moteur »

Les générateurs triphasés (ou moteurs) utilisent un champ magnétique tournant. Le moteur est synchrone, lorsque l'aimant situé au centre tourne à une vitesse constante et se synchronise avec la rotation du champ magnétique [1].

Les machines concurrentes ont opéré une partie importante du marché des transformateurs électromécaniques et couvrent une très large gamme d'énergie allant de quelques mégawatts à environ 1 gigawatt. Traditionnellement, les forces fortes restent le domaine réservé à la production d'électricité. En revanche, en fonctionnement moteur, les forces installées dépassent rarement quelques dizaines de mégawatts [4].

MSAP a été utilisé dans le domaine de la production d'électricité en exploitant l'énergie éolienne sur des sites isolés connectés au réseau de distribution [5-6]. Où en fait, l'inducteur à aimant assure la présence des f.é.m. Et la possibilité de freiner par vent fort, simplifiant la conception des turbines. La sortie qui en résulte simplifie l'élimination des freins à air au bout des pales de l'éolienne.

I.2.1 Constitution de la machine synchrone à aimant permanent(MSAP)

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer [7].

Le dispositif synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour une telle opération, il faut créer un champ magnétique rotatif de deux manières différentes par aimant ou par circuit d'excitation. Ensuite, nous déterminons la position de ce champ pour le rotor, ce qui conduit à la synchronisation du champ magnétique du rotor fixe et du rotor. La

vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. [8-9]

$$\omega_r = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.1})$$

- Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$. [8]
- Le rotor possède différentes configurations. La figure (I.1) montre trois cas typiques pour un rotor à quatre pôles.

*Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux est montrée à la figure (I.1.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.

* Une autre possibilité consiste à disposer les aimants permanents radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiellement comme le montre la figure (I.1.b).

* Enfin la figure (I.1.c) représente le cas où les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale. [8-9]

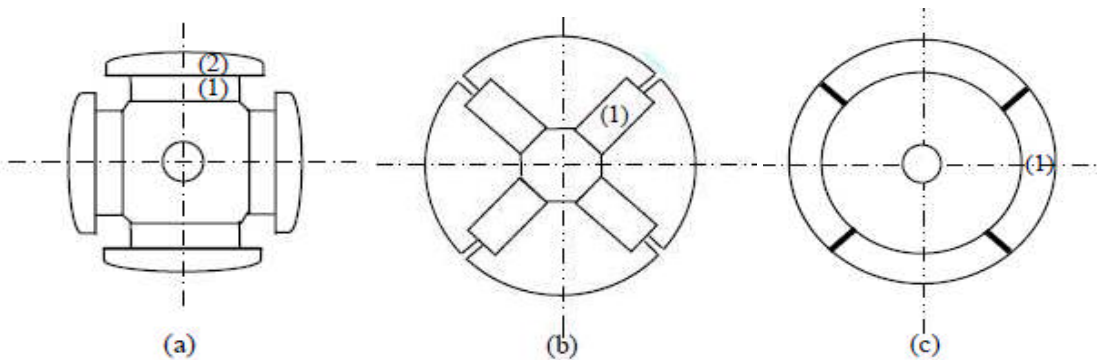


Figure (I.1) : Différents types de rotors d'une MSAP.

(a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2),

(b) aimants permanents (1) noyés,

(c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.

I.2.3 Principe de fonctionnement de la MSAP :

La machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse 90° . La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. [10]

Le fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus simple que celui du moteur à courant continu : le stator muni d'un enroulement polyphasé, triphasé dans la plus part des cas, est alimenté par un système de tensions et courants créant dans l'entrefer un champ d'induction tournante B_{ri} .

I.2.4 Types des machines synchrones

Le rotor d'une machine synchrone se présente sous deux formes distinctes définissant ainsi deux familles de machines, à pôles lisses et à pôles saillants.[1]

I.2.4.1 Machines à pôles lisses

Ce type de machines est caractérisé par un bobinage inducteur réparti dans des encoches fraisées dans la masse du rotor cylindrique, ces machines sont destinées à fonctionner à grande vitesse de rotation, elles sont à entrefer constant.

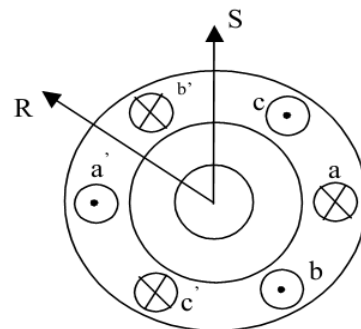
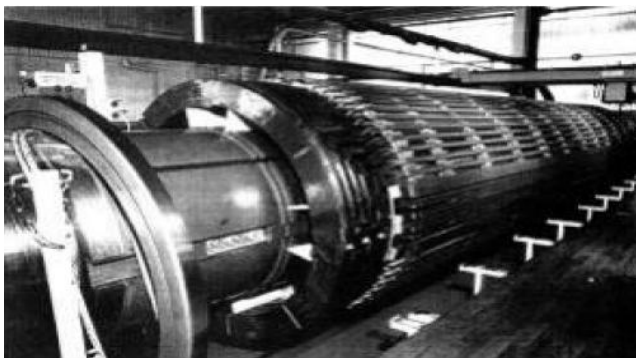


Figure (I.2): Rotor à pôles lisses. [1-5]

I.2.4.2 Machine à pôles saillants :

Cette forme d'exécution est réalisable pour toute vitesse de rotation synchrone et toute puissance, ce type de machines comporte souvent hormis l'enroulement inducteur placé sur les pôles. Un enroulement logé dans des encoches circulaires semi-fermées disposées à la surface de l'épanouissement polaire, cet enroulement est appelé amortisseur.

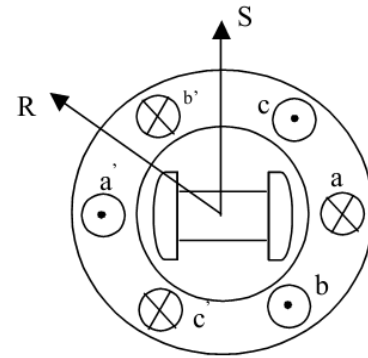
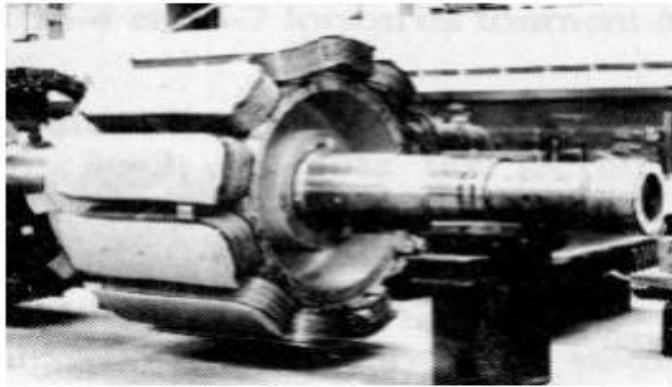


Figure (I.3): Rotor à pôles saillants [1-11]

I.2.5 Différentes types de machines a aimants

I.2.5.1 Machines à flux radial

Historiquement, la machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone. La première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est reparti et les aimants placés en surface (Figure I.4). Dans la littérature, il est possible de la retrouver pour équiper un turbo compresseur (50 kW, 70000 tr/min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40 kW, 6000 tr/min, 4 pôles) (6 kW, 6000 tr/min, 12 pôles). Ces études ont permis de mettre en avant l'augmentation significative du rendement et de la puissance massique par rapport aux machines asynchrones. A l'heure actuelle, cette structure à aimants et simple entrefer sert fréquemment de moteur de référence dans l'optique d'une comparaison avec des moteurs innovants. L'inconvénient majeur de cette machine est l'emplacement des aimants. En effet, en les mettant en surface, les applications à haute vitesse sont difficiles [12-13].

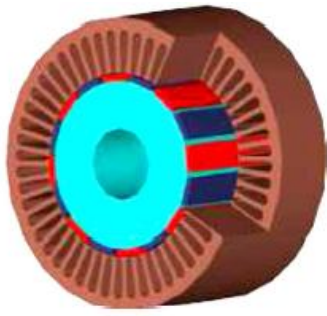


Figure I.4 : Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur

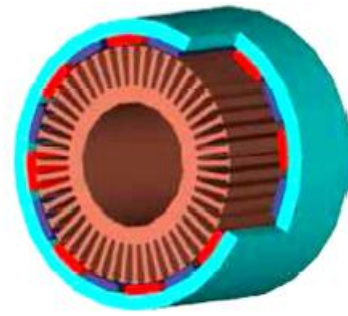


Figure I.5 : Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur.

C'est pourquoi, pour diminuer le risque de décollement des aimants, le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator (Figure I.5). Ainsi, les aimants en surface sont plaqués sur le rotor grâce à l'effet de la force centrifuge. Dans certains cas, le rotor à l'extérieur permet d'incorporer le système électrique dans le système mécanique. Il permet également de fixer des pales directement sur le rotor pour des applications à la ventilation. L'application éolienne (20 kW, 210 tr/min, 36 pôles) et ascenseur en sont également de bons exemples. Néanmoins, l'encombrement de ces machines augmente et les problèmes mécaniques sont plus nombreux.

I.2.5.2 Machines à flux axial

I.2.5.2.1 Machines à flux axial à un stator et un rotor

La première machine à flux axial apparue est une structure comprenant un rotor et un stator.

Le fonctionnement de ce type de machine est basique car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor. Le flux créé par un bobinage reparti classique présent au stator va interagir avec le flux créé par les aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique (Figure I.6). Malgré sa simplicité de conception, cette machine accuse de forts problèmes d'attraction entre stator et rotor imposant des ajouts mécaniques lourds et coûteux [12-13].

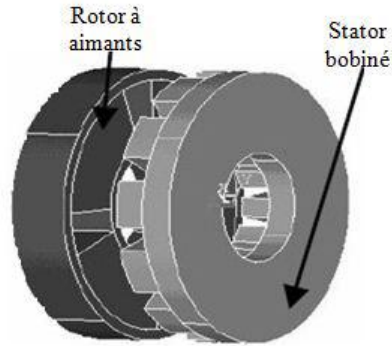


Figure I.6 : Descriptif de la machine à flux axial un stator / un rotor.[14]

1.2.5.2.2 Machines à flux axial à stator interne ou externe

Pour remédier à ce problème d'attraction axiale, les concepteurs se sont penchés sur des machines équipées de 2 entrefers communément appelées à stator interne ou stator externe (Figure I.7 et Figure I.8). Contrairement aux machines à flux radial, la machine à flux axial est bien adaptée à ce genre de concept. La présence de 2 rotors ou de 2 stators permet de rééquilibrer les forces d'attractions entre les pièces actives de la machine et ainsi diminuer le risque d'attraction entre le stator et le rotor. Ces machines obtiennent de bons résultats en termes de couple et de puissance [12-13].

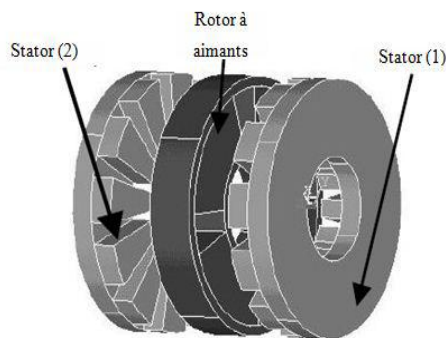


Fig.I.7: Descriptif de la machine à flux axial stator externe. [14]

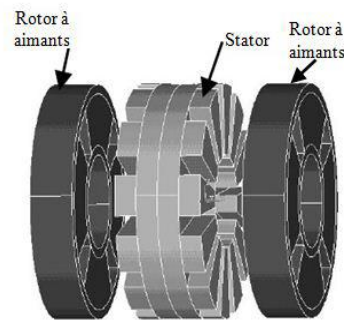


Fig. I.8: Descriptif de la machine à flux axial stator interne.[14]

I.2.5.2.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques

L'adaptabilité est le principal avantage des machines à flux axial multi disques. En effet, pour augmenter la puissance ou le couple d'une machine il suffit d'ajouter sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor. Ces machines s'appellent des machines multi niveaux (Figure I.9). Le principe global de fonctionnement reste identique aux machines discoïdes à simple ou double entrefers. La plupart du temps les machines à flux axial multi disques sont à stator interne. Il est donc possible de réduire au minimum la culasse du stator (voire la supprimer). Les principaux inconvénients sont la difficulté pour bien aligner sur le même axe les différents étages de la machine et la nécessité d'ajouter des renforts mécaniques contre l'attraction magnétique stator / rotor. Le bruit en est une conséquence majeure. Pour certaines applications où la puissance demandée est très importante, la machine multi disques est appropriée. Dans la littérature scientifique, ces machines sont donc étudiées pour des applications à grandes puissances telles que l'éolien ou pour la traction ferroviaire (571 kW, 680 tr/min, 16 pôles) [12-13].

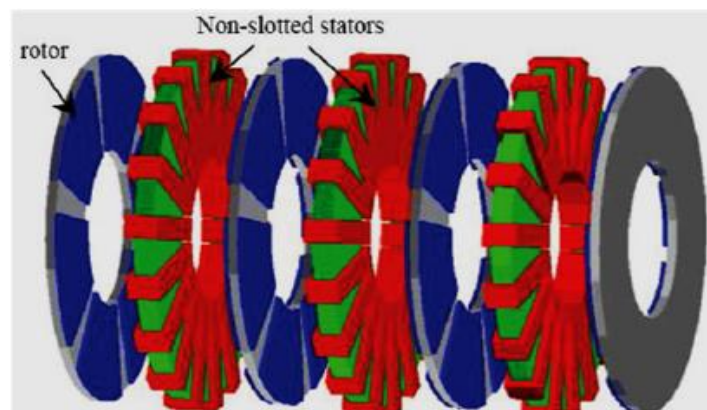


Figure. I.9: Machine à flux axial multi Niveaux [12].

I.2.6 Les aimants permanents

I.2.6.1 Définition Des Aimants Permanents

On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile de se désaimanter lorsqu'il est aimanté.

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure.

I.2.6.2 Matériaux Pour Aimants

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents [15]:

Aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.

Aimants « peu rigides » : Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes que celles des aimants rigides.

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants (Figure I.10):

1-Les alnicos: sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel, et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen.

2-Les ferrites : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum.

Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.

3-Les composés de cobalt et de terres rares comme le samarium. Ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation Coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important [15].

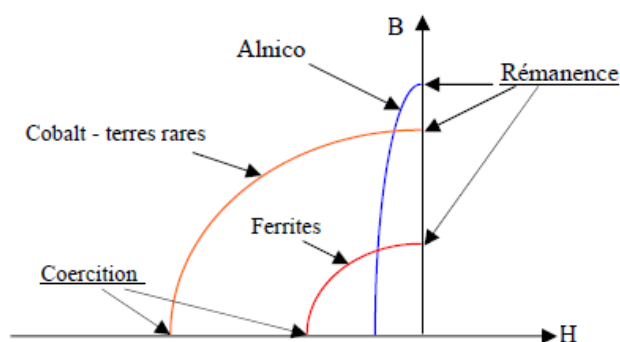


Figure I.10: Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux

I.2.7 Catégories de la MSAP

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :[16 -17]

✓ **Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS)**

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor (figure I.11). Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge.

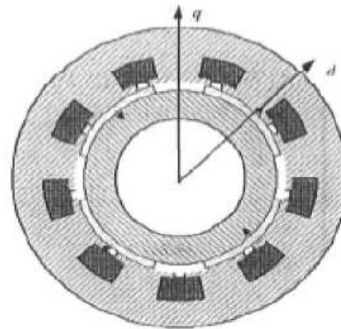


Figure I.11 : Machines synchrones à aimants permanents montés en surface [16-17]

✓ **Machines synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)**

À partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique (figure I.12). Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS.

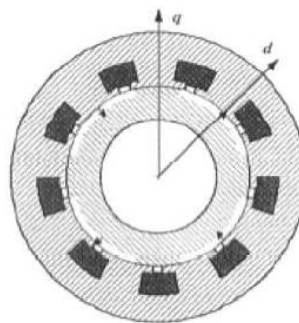


Figure 1.12: Machines synchrones à aimants permanents insérés

✓ Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.e.m au stator en agissant sur le profil de la pièce

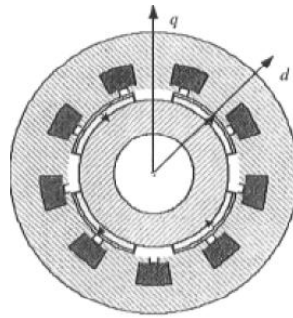


Figure 1.13: Machines synchrones à aimants permanents chapeautés [16]

✓ Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents (figure I.14). En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer.

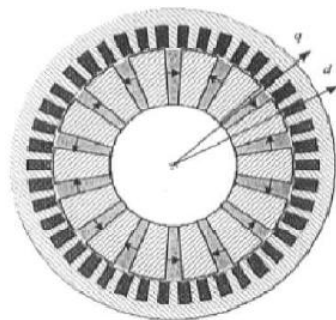


Figure 1.14: Machines synchrones à aimants permanents enterrés [16-17]

I.2.8 Les avantages et l'inconvénient de la MSAP

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

I.2.8.1 Les Avantages

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques [7]. Quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous:

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.
- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses

I.2.8.2 Les Inconvénients

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule (fonctionnement moteur).
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.

- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants

I.9 Les domaines d'application de MSAP

Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières comme [7] comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge).
- les automobiles.
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives).
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- les servomoteurs.
- la production d'électricité.
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- les machines-outils.

I.2.10 Fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone à aimant permanent est une machine réversible donc elle peut fonctionner en deux modes (mode génératrice et mode moteur)

❖ Fonctionnement en mode génératrice (GSAP) :

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. [18].

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des

courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur [7].

❖ **Fonctionnement en mode Moteur (MSAP) :**

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements, le moteur synchrone à aimant permanent reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent à celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance.

Il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator.[7]

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les machines synchrones à aimant et le différent type de cette machine en se basant sur les caractéristiques et les différents types des aimants permanents qui constituent un élément fondamental pour ce type de machine, les avantages et les inconvénients ainsi que les domaines d'applications de la MSAP enfin terminée ce chapitre par le fonctionnement de cette machine .

Ce deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation de la GSAP.

Chapitre II

Modélisation et simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents

II.1 Introduction

L'augmentation croissante de l'utilisation des machines électriques dans diverses applications a grandement contribué à la forte demande d'énergie dans l'industrie.

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînés par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde..

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique. Nous avons étudié cette machine pour la contrôler, nous avons besoin de la mettre sous la forme d'un modèle mathématique qui reproduit tous ces paramètres (résistance, induction, ...), ce qui a permis de mettre en évidence certains des phénomènes qui apparaissent au cours du fonctionnement. De plus, ce modèle nous aide grandement à résoudre les problèmes techniques qui se produisent pendant les applications.

[15]

Dans ce chapitre, nous rappellerons les éléments des constituants de cette machine, puis, nous décrirons la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents dans le repère lié au rotor et dans le repère lié au stator (repère de Park).pour différents mode de fonctionnement (à vide, en charge) ainsi que les résultats de simulation.

II.2 Description

L'alternateur est constitué de deux parties, une partie fixe et une partie tournant. Le stator ou induit est constitué d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à 2p pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $\frac{2\pi}{3}$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte p pôles

nord et p pôles sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses [17-19].

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation :

$$f = \frac{pn}{120} \quad (\text{II-1})$$

II.3 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur [17-19]

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau, Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé.

II.4 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation.[20]

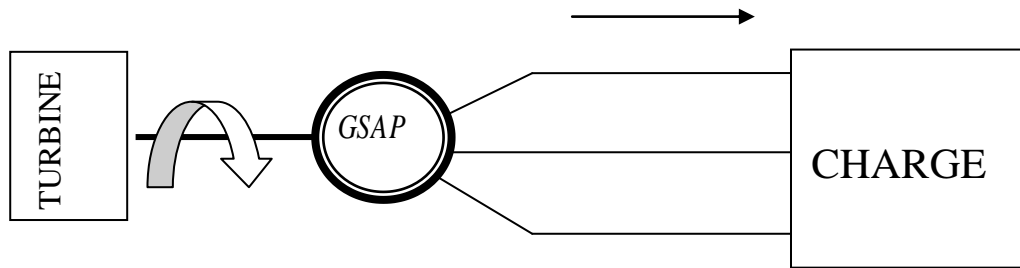


Figure II.1 : Schéma représentatif de la GSAP

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce cela permet d'étudier le comportement de différentes variables de manière dynamique et statique et d'utiliser ce modèle dans les simulations.[21]

II.4.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone électrique obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices:

L'absence de saturation dans le circuit magnétique.

- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.[15]

II.4.2 Équations électriques de la GSAP

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [-R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

$[v_a \ v_b \ v_c]^T$: Vecteur tension de phases statoriques..

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrones considérés sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

II.4.3 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II-2).

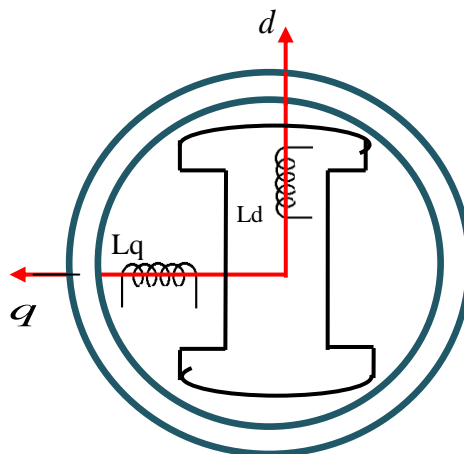


Figure II.2 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [15].

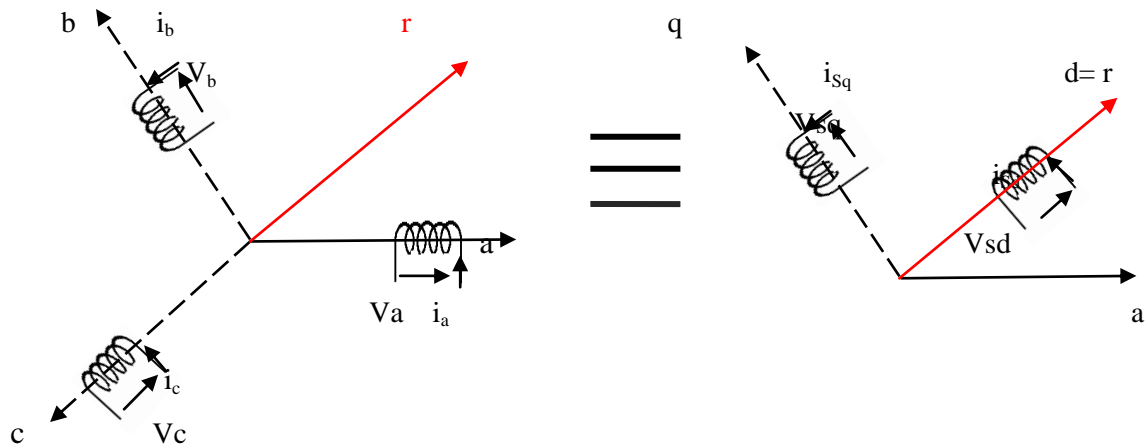


Figure II.3: Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

A l'aide de transformation de Park on passe de grandeurs réelle (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) a leurs composantes (v_0, v_b, v_c) et (i_0, i_b, i_c)

La matrice de Park s'exprime par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

La transformation inverse de Park et donne par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

II.4.4 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, ψ_d et ψ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

L_d et L_q sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ .

ψ_f représente le flux des aimants.

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park (figure II-4), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

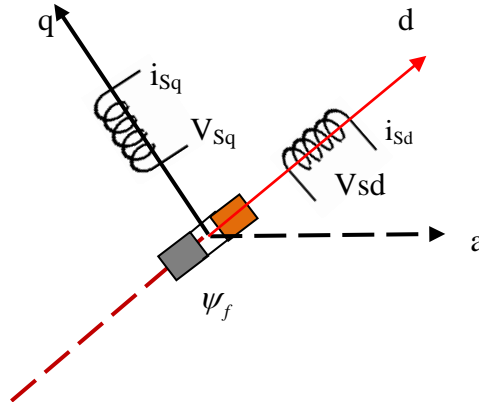


Figure II.4: Modèle de PARK pour la GSAP

II.4.5 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor[15] :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (\text{II-7})$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II-8})$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (\text{II-9})$$

$\frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator [35].

$\frac{3}{2} [i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [35].

$\frac{3}{2} [\frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)]$: Représente la puissance électromagnétique.

$$\text{Sachant que : } p\Omega = \omega \text{ et } P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{II-10})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{II-11})$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [15]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (\text{II-12})$$

II.4.6 Equations mécaniques

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$C_m - C_{em} - f \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II-13})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f \Omega$: Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.5 Simulation de la GSAP

Dans cette partie la GSAP nous présentons la simulation de la GSAP de deux cas distincts "à vide et charge". Dans le deuxième cas, le stator de la machine est relié à une charge 'R, L' telle que : ' R_{ch}, L_{ch} '

II.5.1 GSAP à vide

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

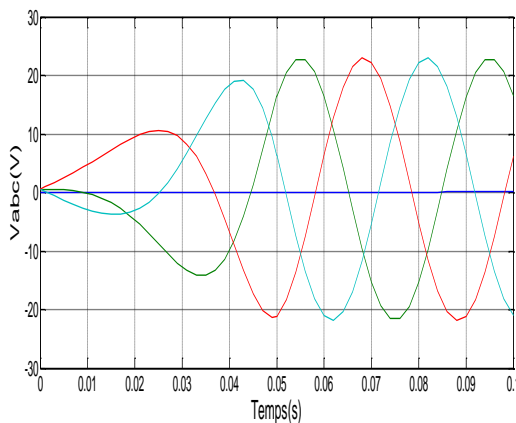
Les expressions des tensions et couple deviennent:

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

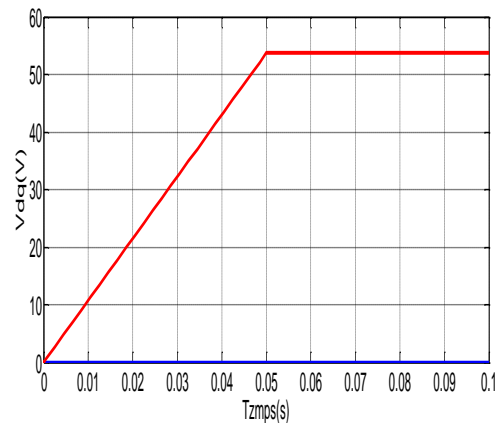
On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 6.28Nm pour une durée de 0.1(ms), puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II-6) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 (rad/s). alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable

II.5.1.1 Résultats de simulation

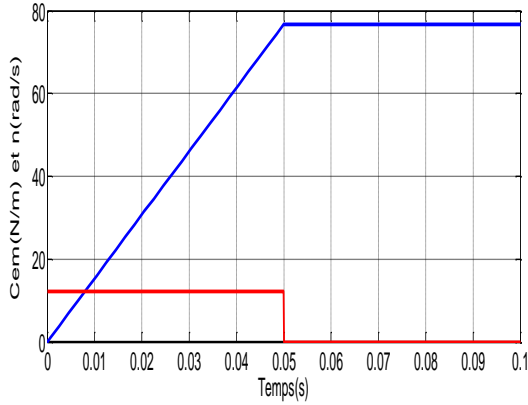
Les résultats de simulation de la GSAP à vide sont montrés dans les fig. II-6.a, fig. II-6.b fig.II-6.c



(a) : la tension v_{abc}



(b) : la tension v_d et v_q



(c) : vitesse de rotation et couple moteur

Figure II.5: GSAP à vide

II.5.2 GSAP en charge séparée (R_{ch}, L_{ch})

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch}, L_{ch})

Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II-6) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne:

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (II-16), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

En introduisant la transformée de **LAPLACE** dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} S I_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch}) I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \right] \\ S I_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch}) I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \psi_f \right] \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Considérons le flux d'excitation ψ_f comme grandeur de commande, et les courants I_d, I_q comme variables d'état.

II.5.2.1 Equations d'état

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équations d'état:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \end{bmatrix} = [A][x] + [B][v] \quad (\text{II-20})$$

$$[x] = [i_d \quad i_q] \quad ; \quad [v] = [0 \quad \psi_f] \quad (\text{II-21})$$

Les équations (II-23), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (II-22).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \psi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

$$[B][v] = \omega \cdot \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

II.5.2.2 simulations de GSAP en charge

A partir des équations (II-20 à II-24, et II-13), on construit le bloc de simulation de la génératrice (figure II-7).

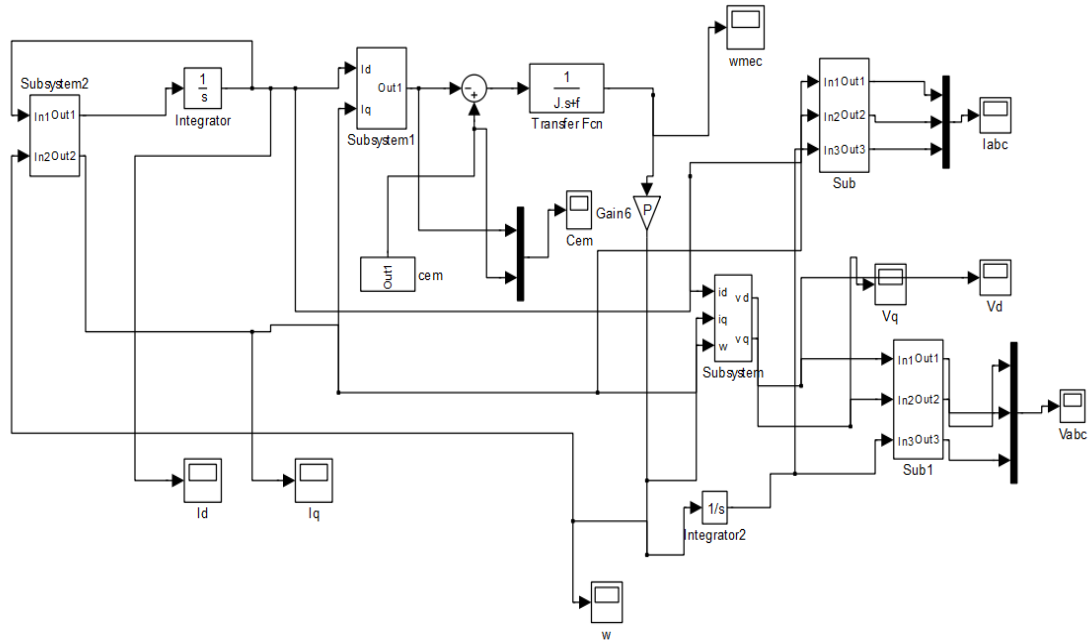
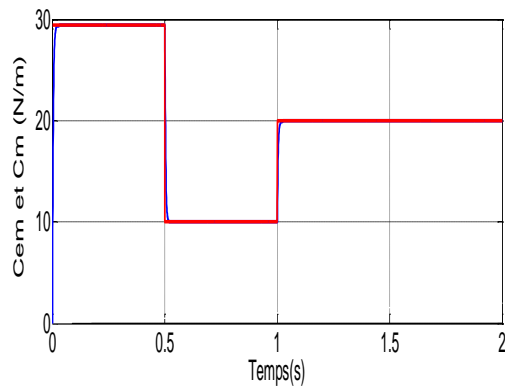


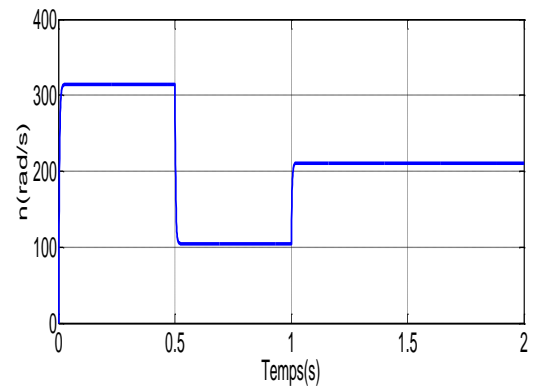
Figure II.6: Bloc de simulation de la GSAP en charge

II.5.2.3 Résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenue sont montés par les figures suivant :



a: Couples électromagnétique et moteur



b: vitesse de rotation

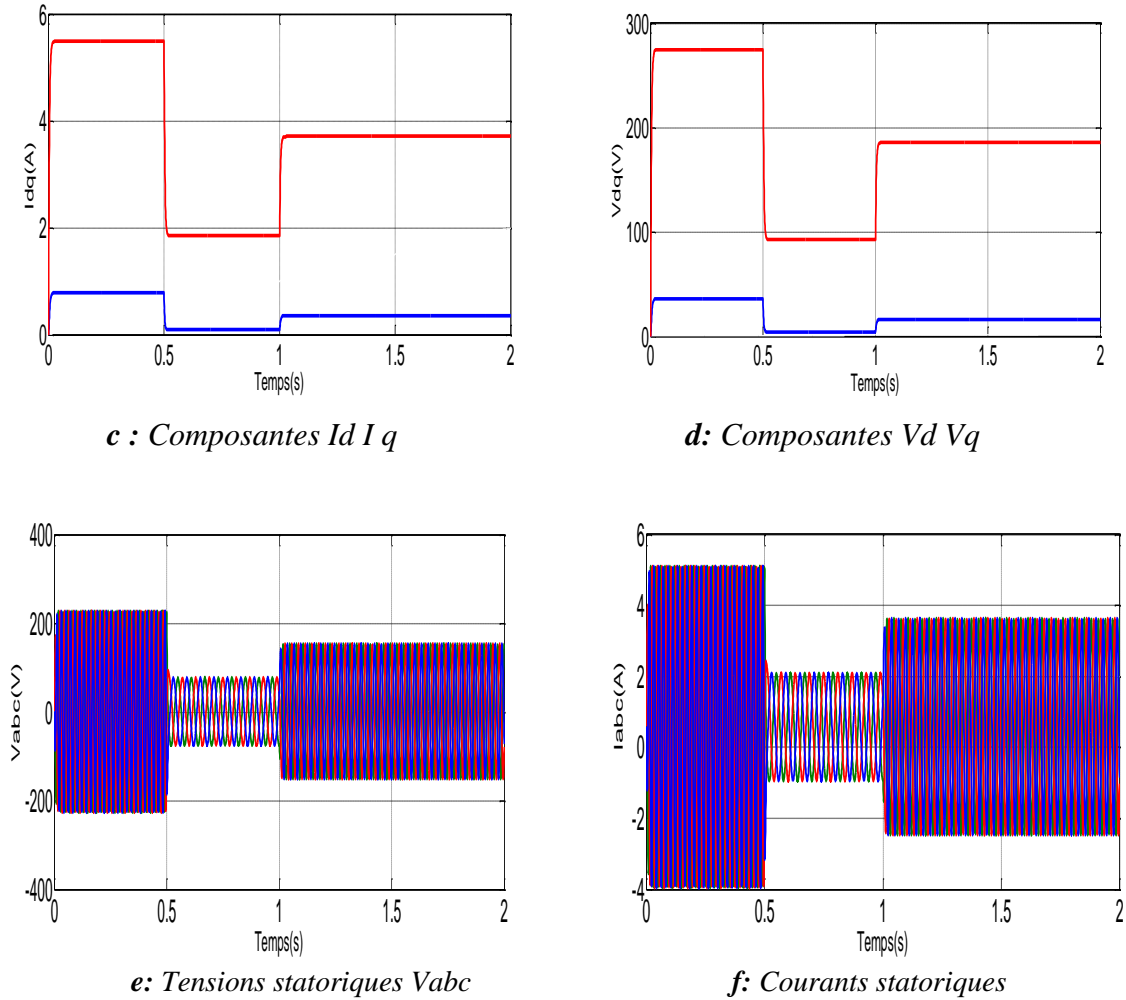


Figure II.7: simulation GSAP sur une charge séparée

II.5.2.4 Remarque :

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, trois couples moteurs différents sont appliqués. On constate sur la figure que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les figures. Ce-ci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 29.47 (Nm), à 10 (Nm), la vitesse mécanique varie de 78.5(tr/mn) jusqu'à 26.17(tr/mn). La tension et le courant diminuent respectivement de 225 (V), à 76 (V), et de 5.1 (A), à 2.08 (A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté la description et le principe de fonctionnement de la machine synchrone a aimant permanent en suite nous avons abordé la modélisation de génératrice synchrone a aiment permanent dans sa structure générale ce modèle a été validé par les résultats de simulation aboutis pour une génératrice à vide, avec une charge.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier la commande vectorielle de la génératrice synchrone a aimant permanent.

Chapitre III :

Commande vectorielle de la GSAP

III.1 Introduction

La commande des machines à courant alternatif est difficile car le modèle mathématique du système dans le repère de *Park* est non linéaire et il est fortement couplé du fait de l'existence d'un couplage complexe entre les deux armatures rotorique et statorique.[22]

Afin obtenir les offres requises dans le système de contrôle, on est amené à adjoindre au système commandé des organes extérieurs appelés régulateurs, qui ont le rôle de maintien de la quantité réglés a la valeur du point spécifique même s'il existe troubles en coures d'organisation . En définissant ses propres procédures et paramètres, il est possible d'obtenir le comportement requis en bouclée fermée, ce qui caractérise les performances du système. Parmi ces régulateurs, le régulateur PI est une combinaison d'un régulateur proportionnel et d'un régulateur intégré. Les deux ajustés correctement, combinent leurs avantages, l'un compensant les inconvénients de l'autre.[23]

Dans ce chapitre nous allons exposer la commande vectorielle de GSAP en fonction de la variation de vitesse vent. La boucle de courant et la boucle de vitesse sont régulées à l'aide de correcteurs PI.

III.2 Energie éolienne

Le vent est engendre par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre ; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent cause par le mouvement de l'air contient une grande qualité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical ils ont été employés dans les montagnes [24].

Le terme 'aérogénérateur' désigne une manière générale une machine capable de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180 [24], en France en1190, en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Dans cet élan, en1888, Charles F.Brush,

un scientifique américain de Cleveland en Ohio, construit la première turbine éolienne capable de produire de l'électricité avec un diamètre de rotor de 17 mètres et compose de 144 pales en cèdre.

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin en moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année.

III.3 Commande vectorielle de la GSAP

III.3.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [15]

L'objectif de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leur comportement statique et dynamique grâce notamment à une structure similaire à celle d'une machine à courant continu. [23]

La commande de la génératrice est basée sur un pilotage vectorielle classique avec capteur de position. Le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique $P\Omega$. Un autre champ magnétique tournant est appelé la réaction de l'induit est produit par les enroulements de stator.

La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation:

$$\Omega = \frac{\omega}{P} \quad (\text{III-1})$$

Où p est le nombre de paires de pôles de la machine. Si on suppose un fonctionnement de la machine à vide et sans pertes, seul le flux magnétique d'excitation apparaît. La commande vectorielle classique consiste à aligner un des deux axes du repère de Park, généralement l'axe direct d selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation [15].

Lorsque la machine est chargée, une réaction d'induit apparaît et déplace le flux d'excitation.

Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation dépendent donc des courants statoriques et du flux magnétique. Comme nous avons vu dans le chapitre, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park est donné par les équations différentielles:

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \omega L_q i_q \\ V_q = -R_s \cdot i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Avec:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \omega \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

devient:

$$\begin{aligned} V_d &= -R_s i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \omega \psi_q \\ V_q &= -R_s i_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (\text{III-4})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{III-5})$$

Pour une machine synchrone à **pôles lisse** on a:

$$L_d = L_q = L_s \quad (\text{III-6})$$

La force électromotrice de la génératrice est donnée par :

$$E_0 = p \Omega \psi_f \quad (\text{III-7})$$

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_d égale à zéro est la plus répandue. Le couple électromagnétique est donné donc par l'expression :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \psi_f i_q \quad (\text{III-8})$$

Ainsi il est possible de contrôler le couple électromagnétique en contrôlant le courant i_q tandis que le courant id est asservi à zéro.

III.3.2 Synthèse des correcteurs

On propose de mettre en œuvre des régulateurs de type PI dans la structure de commande. Les équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents peuvent être écrites par la forme :

$$\begin{aligned} V_d &= R_s I_d (p) + PL_s I_d - \omega \psi_q (p) \\ V_q &= R_s I_q (p) + PL_s I_q - \omega \psi_d (p) \end{aligned} \tag{III-9}$$

Les termes de couplage en $E_{dq} = \omega \psi_{dq}$ sont considérés comme des perturbations mesurables.

La fonction de transfert de la machine peut s'écrire sous la forme :

$$G_s (p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \tag{III-10}$$

$$G_s (p) = \frac{I_{dq} (p)}{V_{dq} (p) + E_{dq} (p)} \tag{III-11}$$

Avec la constante de temps électrique:

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \tag{III-12}$$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la Figure III. 1, (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q).

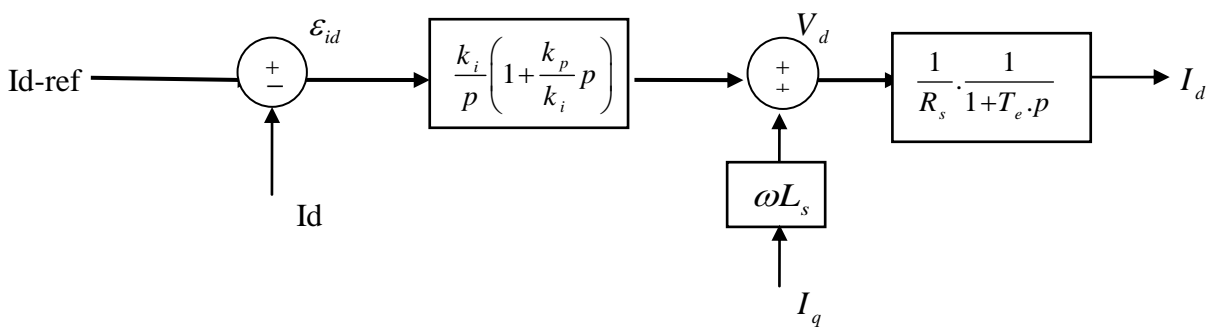


Figure III.1 : Boucle de régulation de courant

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par:

$$G_0(p) = \frac{k_{ci}}{p} \left(1 + \frac{k_{cp}}{k_{ci}} \cdot p \right) \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e \cdot p} \tag{III-13}$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle en

boucle ouverte. Ainsi, les constantes de temps sont égales à :

$$T_0 = T_e = \frac{k_{cp}}{k_{ci}} \tag{III-14}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert devient :

$$G_s(p) = \frac{G_0(p)}{1+G_0(p)} = \frac{1}{1+\frac{R_s}{k_{ci}} \cdot p} = \frac{1}{1+T_f \cdot p} \tag{III-15}$$

En boucle fermée la constante de temps T_f est donc égale à :

$$T_f = \frac{R_s}{k_{ci}} \tag{III-16}$$

$$\text{Alors: } k_{ci} = \frac{R_s}{T_f} \tag{III-17}$$

Le coefficient proportionnel k_{cp} du régulateur est :

$$k_{cp} = \frac{L_s}{T_f} \tag{III-18}$$

La figure (III-2) illustre la stratégie de commande en couple, elle comporte les boucles de régulation de courants et le découplage des tensions.

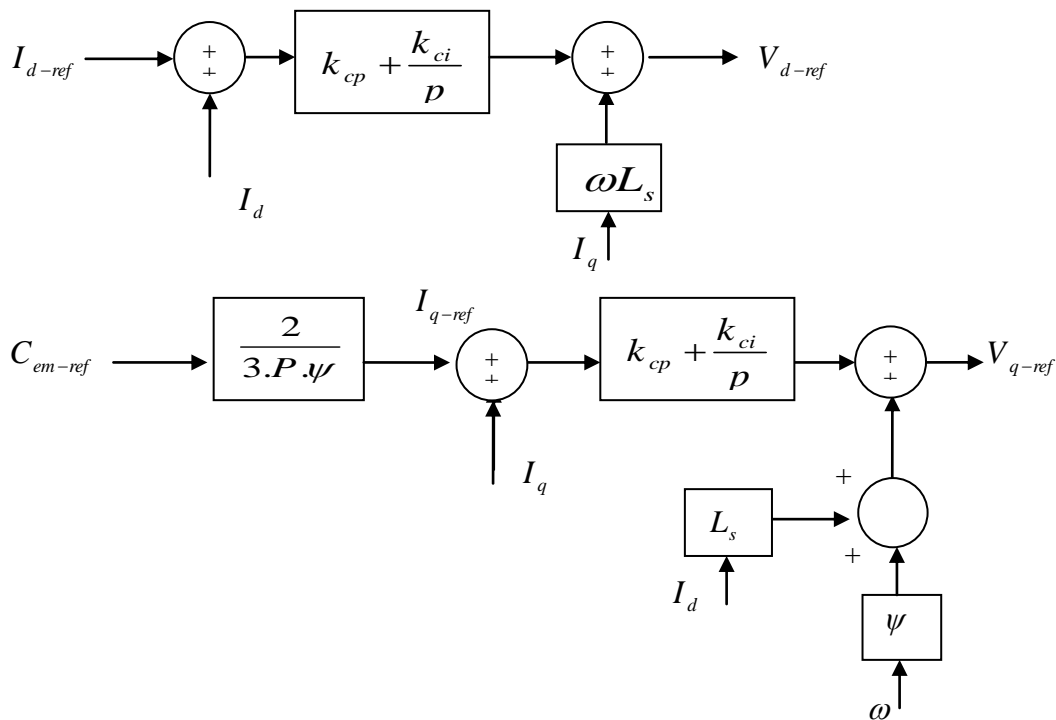


Figure III.2 : stratégies de commande en couple de GSAP

III.6 Simulation de la commande vectorielle de GSAP

Dans cette partie nous allons appliquer la commande vectorielle de GSAP sera simulée sur deux cas distincts « la vitesse de vent est constante et variable »

III .6.1 simulation de la GSAP pour la vitesse de vent est constant :

Commentaire

Dans ce cas ,pour la vitesse de vent est constant nous avons donnees une valeur pour chaque durée en utilisant step, on peut voir sur la figure que la vitesse de générateur est faible mais constante et éloignée de la vitesse de synchronisation, cela se traduit par de basses fréquences de tension et de courant montrée dans les figures, cela s'explique par le fait que la vitesse du vent appliquée est insuffisante.

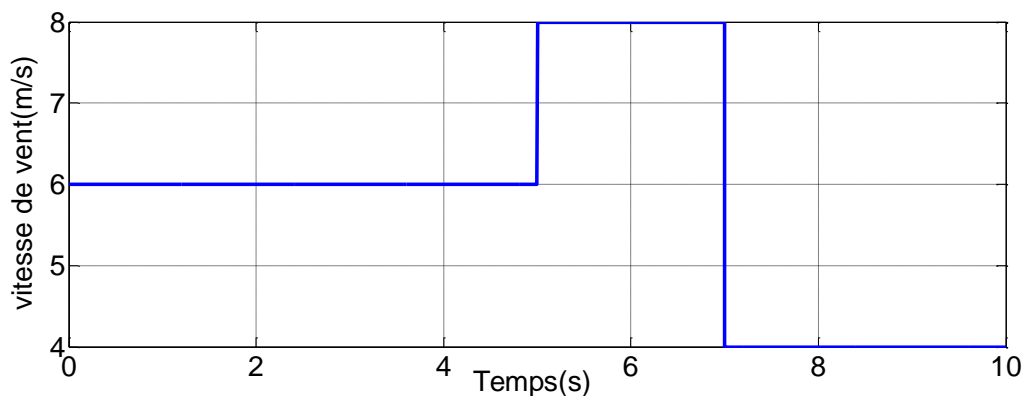
-pour une vitesse du vent égale à 6, nous notons une diminution du courant et de la tension, ainsi que la vitesse de rotation.

-Nous appliquons une plus grande valeur à la vitesse du vent, nous remarquons une augmentation du courant et de la tension ainsi que la vitesse de rotation.

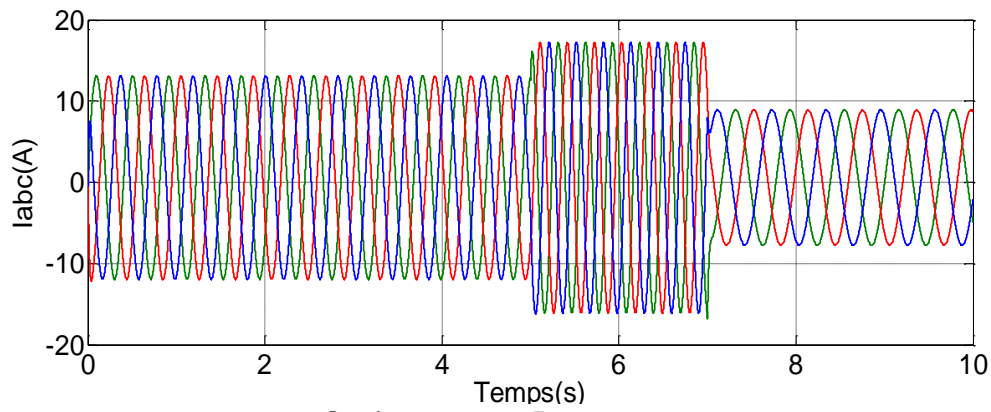
-la composante I_d est maintenue à zéro par le régulateur de courant.

Résultats de simulation :

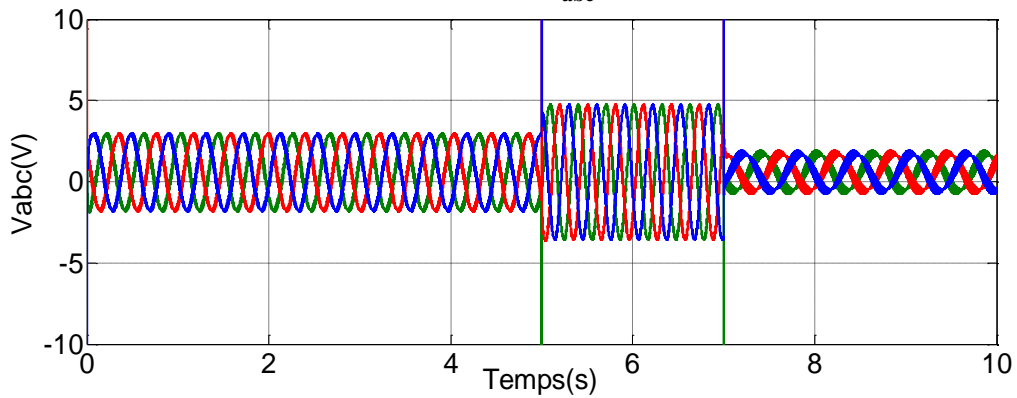
Nous présentons quelques résultats de simulation de la commande du génératrice synchrone à aimants permanents :



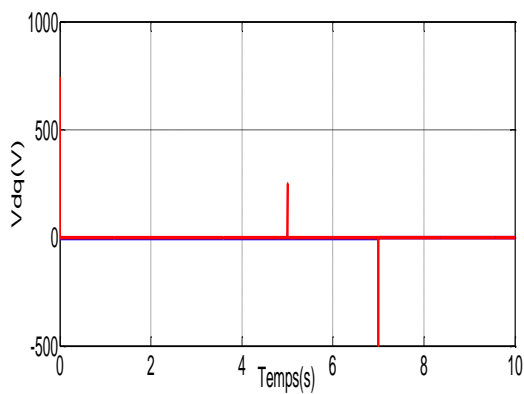
a : la vitesse de vent



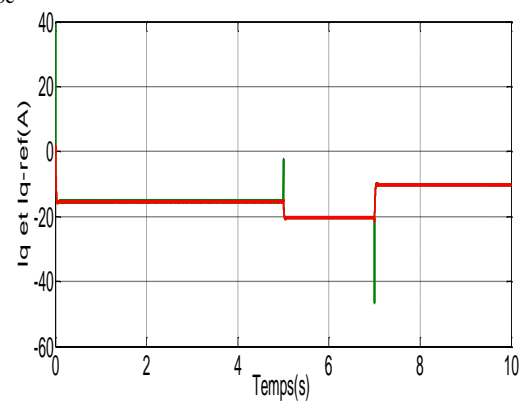
b : les courants I_{abc}



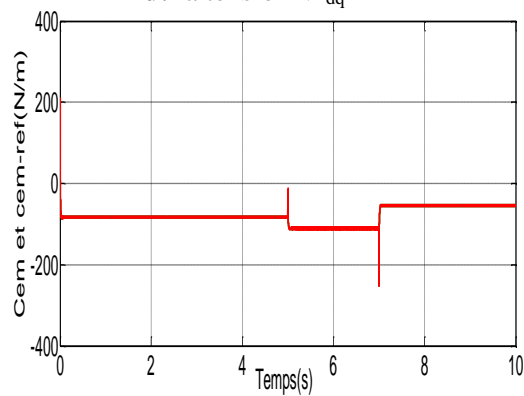
c : les tension V_{abc}



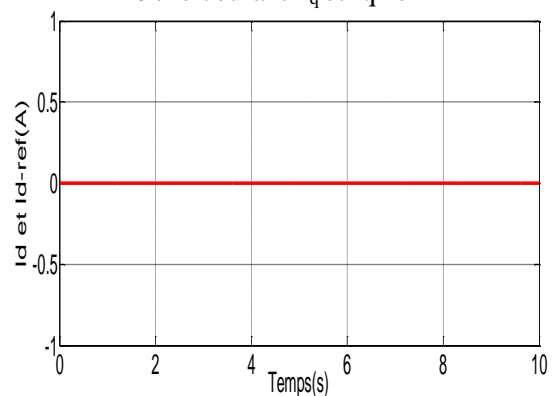
d: la tension V_{dq}



e : le courant I_q et I_q -ref



e : les couple C_{em} et C_{em-ref}



f : le courant I_d et I_d -ref

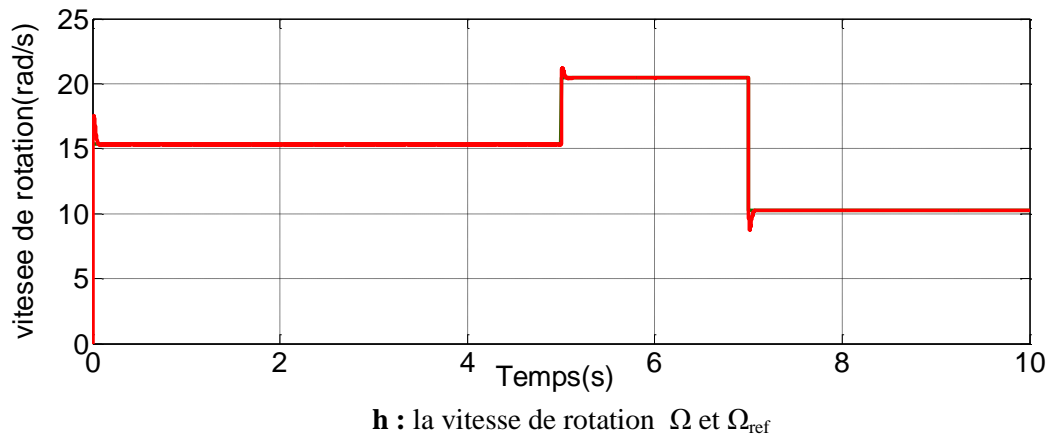


Figure III.4 : simulation de GSAP a vitesse de vent constante

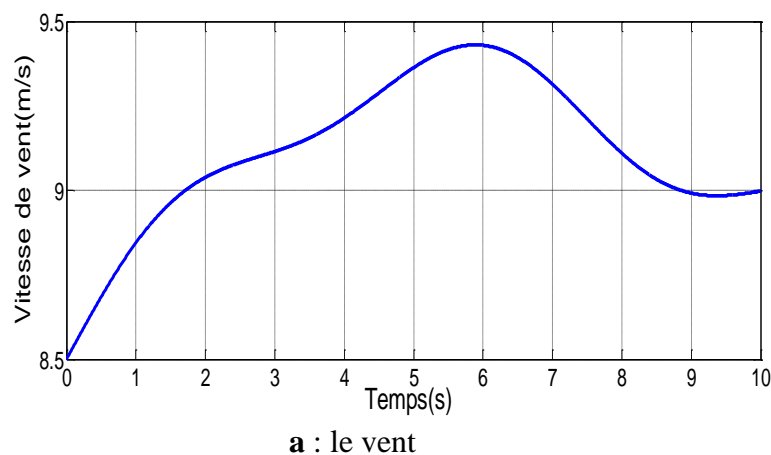
III .6.2 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est variable

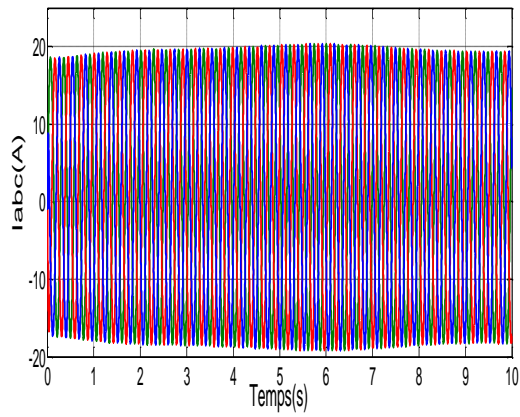
Remarque :

Pour vitesse du vent variable, nous remarquons que la vitesse du générateur est variable.
-Le courant et la tension varient en fonction du changement de vitesse de vent représentés sur les figures

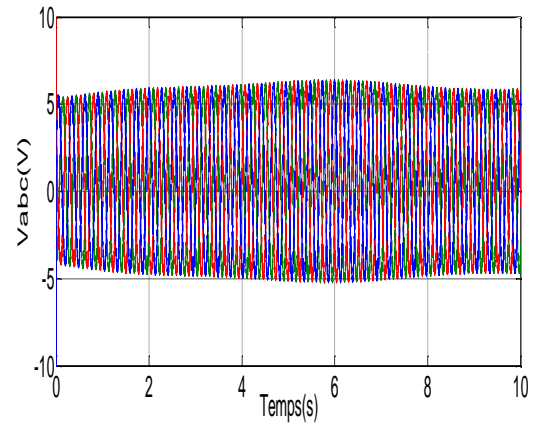
Alors que les tensions et les courants des phases sont parfaitement sinusoïdaux à chaque valeur la composante I_d est maintenue à zéro par le régulateur de courant.

Résultat de simulation :

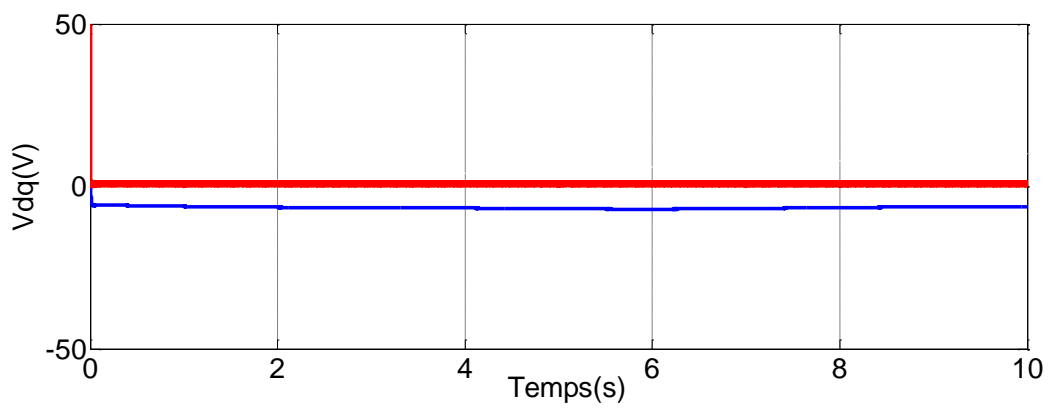




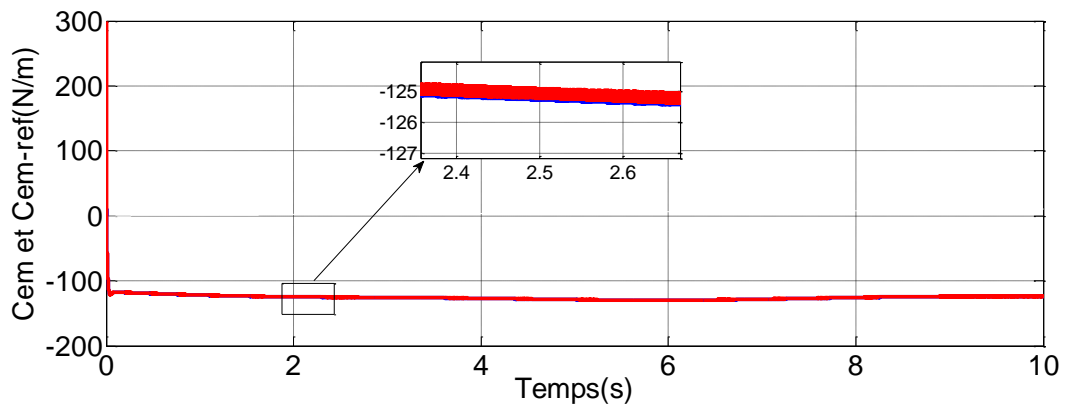
b : les courants I_{abc}



c : les tensions V_{abc}



d : les tensions V_{dq}



e : le couple électromagnétique

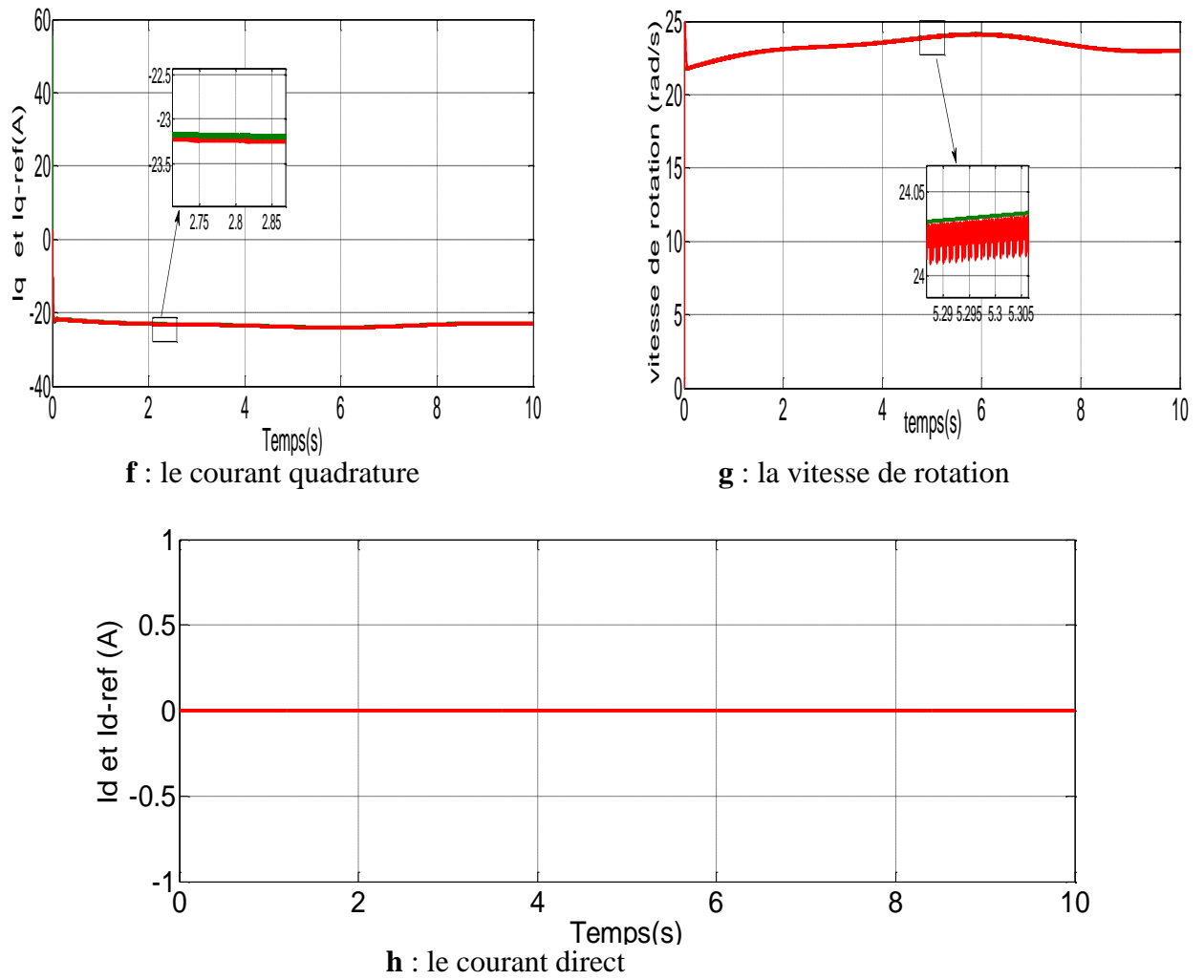


Figure III.5 : simulation de GSAP a vitesse variable

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliquée de la commande vectorielle sur la GSAP, Une autre fois on a distingué que les régulateurs classiques (PI) donne toujours des meilleurs résultats pour un réglage de vitesse mais l'inconvénient majeur de ses régulateurs reste la sensibilité pour les changements des paramètres de la machine d'après les résultats obtenu dans l'étude de la robustesse.

Dans le chapitre suivant nous allons appliquer la commande de GSAP par les RNA

Chapitre IV :

Commande de la GSAP par réseaux de neurone

IV.1 Introduction

Les régulateurs traditionnels (PI) offrent toujours de meilleurs résultats pour le réglage de la vitesse .mais nous avons trouvé un inconvénient majeur pour leurs organisateurs selon les résultats obtenus dans l'étude de la robustesse. pour cela, nous avons abordé l'utilisation d'un nouveau mécanisme de contrôle .qui sont contrôlés par des réseau de neurone.

Les réseaux de neurones, constitués de structures cellulaires artificielles, fournissent une approche permettant d'aborder les problèmes de cognition, de mémoire, d'apprentissage et de réflexion sous un angle nouveau. Ils se sont également révélés être des alternatives très prometteuses pour contourner certaines restrictions imposées aux ordinateurs traditionnels. Grâce au traitement parallèle de l'information et à ses mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), il en déduit des propriétés émergentes pour la résolution de problèmes complexes.[25]

Les RNA constituent une technique de traitement de données bien comprise et bien maitrisée.

Ces techniques s'intègrent parfaitement dans les stratégies de commande.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu la commande vectoriel de GSAP.

Ce chapitre se compose de deux parties principales :

Dans la première partie, nous présenterons les principales notions de base relatives aux réseaux de neurones.

Dans la seconde partie, nous appliquons la commande de GSAP par les réseaux de neurone.

IV.2. Notions sur les réseaux de neurones artificiels

IV.2.1 Historique

En général, les réseaux de neurones artificiels débutent en 1943, avec "McCulloch et Pitts" qui montrent qu'un réseau de neurones discrets sans la topologie de la contrainte, peut représenter toute fonction logique, donc Simulation informatique.

En 1958, "Rosenblatt" propose le premier algorithme d'apprentissage, qui permet d'ajuster les paramètres des neurones. En 1969, Minsky et Papert ont publié le livre "Perceptrons", dans lesquels ils utilisent un argument mathématique fort pour montrer les limites des réseaux de neurones monocouche.

En 1986, « *Rumelhart, Hinton et Williams* » publient l'algorithme de la 'retro propagation de l'erreur' qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches. À partir de ce moment. Depuis lors, la recherche sur les réseaux de neurones s'intensifie éblouissant, dans les années 1990, applications commerciales de ce succès académique de suivi. [26]

IV.2.2 Objectifs de la commande par les RNA

Les réseaux de neurones sont bien connus pour leurs capacités d'apprentissage et d'approximation de fonctions continues quelconques. Ils ont été appliqués à l'identification des paramètres, l'estimation dans l'espace d'états des systèmes de commande. La commande par réseaux des neurones artificiels d'un générateur synchrone à aimant permanent est rarement utilisée à cause de la complexité du contrôleur à utiliser. [27]

IV.2.2 Le modèle neurophysiologique (neurone biologique)

Le cerveau humain est le meilleur modèle pour une machine incroyablement rapide et polyvalente et est particulièrement doté d'une capacité d'autorégulation idéale. Son comportement est plus mystérieux que le comportement de ses cellules de base. Il est constitué d'unités biologiques primaires (environ 10¹² neurones), chacune recevant et transmettant des informations (1000 à 1000 paires par neurone). Les cellules nerveuses appelées "neurones" qui sont des éléments de base du système nerveux central. Elles sont constituées de trois parties essentielles, le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [25]

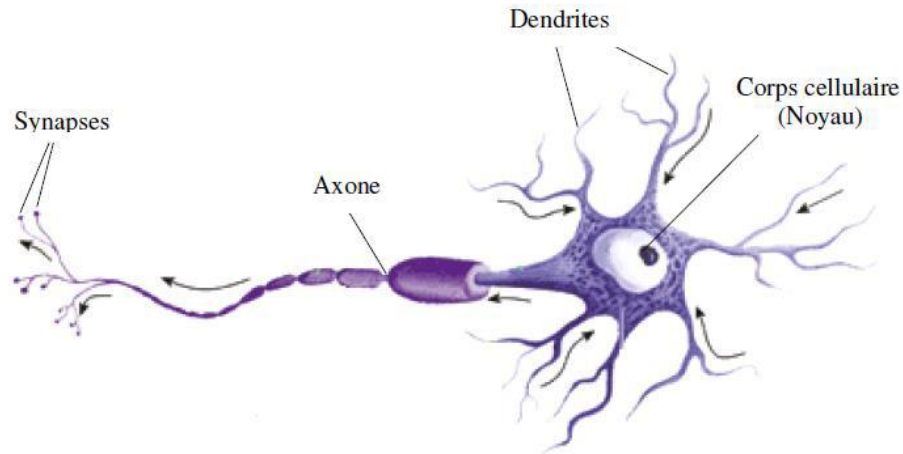


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un neurone biologique.

L'architecture biologique du neurone est présentée sur la figure (IV.1) Les dendrites sont considérées comme les portes d'entrées des neurones. Elles sont les réceptrices principales du neurone permettant de capter les signaux lui parvenant. Ensuite, un traitement de toutes ces informations a lieu au niveau du corps cellulaire. Les principales lignes de transmission du système nerveux sont les axones. Ils servent de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone, vers d'autres neurones. L'information va transiter de neurone en neurone le long de l'axone jusqu'aux muscles via un potentiel d'action (un signal électrique).

IV.2.3 Neurone formel

Le neurone formel est une modélisation mathématique qui reprend les principes du 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 connexions entre les neurones étant plus au moins fortes), les chercheurs ont donc créé un algorithme qui pondère la somme de ses entrées par des poids synaptiques (coefficients de pondération). En général, un neurone formel est un élément de traitement possédant n entrées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie y_i le résultat d'une fonction d'activation f de la somme pondérée.[28-29]

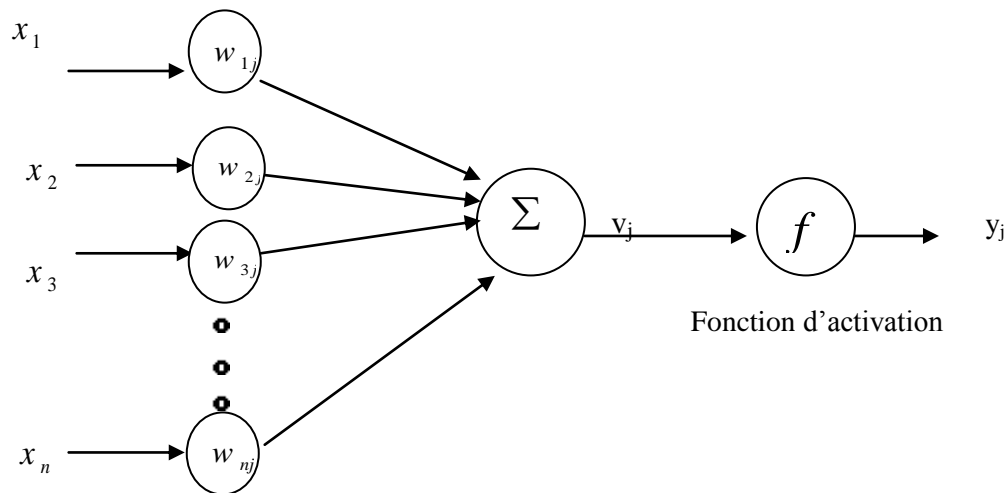


Figure IV.2 Modèle d'un neurone formel

Avec :

- Les x_i sont les entrées du réseau.
- v est le potentiel d'activation.
- Les w_{nj} représentent les poids synaptiques.
- y_i la sortie du réseau tels que : $y_j = f(v_j)$ $v_i = \sum_{j=1}^n x_i w_{ij} + b_j$

IV.2.3.1 Présentation mathématique

Les réseaux de neurones formels sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain (figure IV-2). Ils présentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle [25-26]. La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de réseau neuronal sous un aspect non pas biologique mais artificiel.

Par analogie avec la biologie, un neurone artificiel figure (IV.2) reçoit l'information provenant des entrées x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) par l'intermédiaire des connexions dont on affecte à chacune d'elles un poids w (en anglais weights) pondérant l'information reçue, appelé aussi poids synaptique. Deux fonctionne en deux étapes:

La première phase représente le prétraitement des données reçues en calculant le potentiel v_j du neurone j par la fonction suivante:

$$v_j = b_j + \sum_{i=0}^n w_{ji} x_i \quad (\text{IV.1})$$

Où w_{ji} désigne le poids de la connexion liant le neurone j à l'entrée i , et b_j est un terme constant appelé biais qui peut être considéré comme le poids d'une entrée x_0 égale à 1. Ainsi, la relation 4.2 s'écrit plus simplement:

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{ji} x_i \quad (\text{IV.2})$$

Les neurones que nous allons utiliser sont des neurones linéaires qui effectuent une somme pondérée des entrées. Mais, il en existe d'autres dans la littérature (neurone distance, neurone polynomial, neurone de type noyau, etc...).

Dans la deuxième phase, une fonction de transfert f appelée également fonction d'activation calcule la valeur de l'état interne y_j du neurone j à partir de la valeur du potentiel v_j . Cette valeur désignera la sortie du neurone :

$$y_j = f(v_j) = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i\right) \quad (\text{IV.3})$$

Les variables x_i désignent les entrées, la sortie est notée y_j , le biais b_j et les poids synaptiques sont désignés pour w_{ji} .

Ainsi, le neurone peut être défini mathématiquement comme étant une fonction algébrique, a priori non linéaire (suivant f) et bornée, des entrées x_j et paramétrée par les poids w_{ji} :

$$y_j = f(v_j) = f(x_j, w_{ji}) \quad (\text{IV.4})$$

4.2.3.2 Fonctions d'activation

Dans sa première version, le neurone formel était donc implémenté avec une fonction à seuil, mais de nombreuses versions existent. Ainsi le neurone de McCulloch et Pitts a été généralisé de différentes manières, en choisissant d'autres fonctions d'activations. [26]

les fonctions mathématiques les plus souvent utilisées sont : la fonction seuil représenté sur la figure (IV.3) (a)

$$f(x) = 0 \quad \text{si } x < 0 \quad (\text{IV.5})$$

$$f(x) = 1 \quad \text{si } x \geq 0 \quad (\text{IV.6})$$

La fonction identité (dite linéaire) figure (IN.3) (b)

$$f(x) = x \quad \forall x \quad (\text{IV.7})$$

La fonction sigmoïde figure (IV.3) (c), dont les formes les plus utilisées sont la fonction logistique et la fonction tangente hyperbolique

La fonction tangente hyperbolique :
$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \tag{IV. 8}$$

La fonction logistique :
$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{IV. 9}$$

La fonction gaussienne d'écart type unité (fig. 4.3.(d))

$$f(x) = e^{-x^2} \tag{IV.10}$$

Toutes ces fonctions sont continues et différentiables (sauf la fonction seuil). L'une des fonctions les plus souvent utilisées est la fonction sigmoïdale. En effet, elle assure le caractère non linéaire du modèle neuronal qui en fait une approximation universelle.

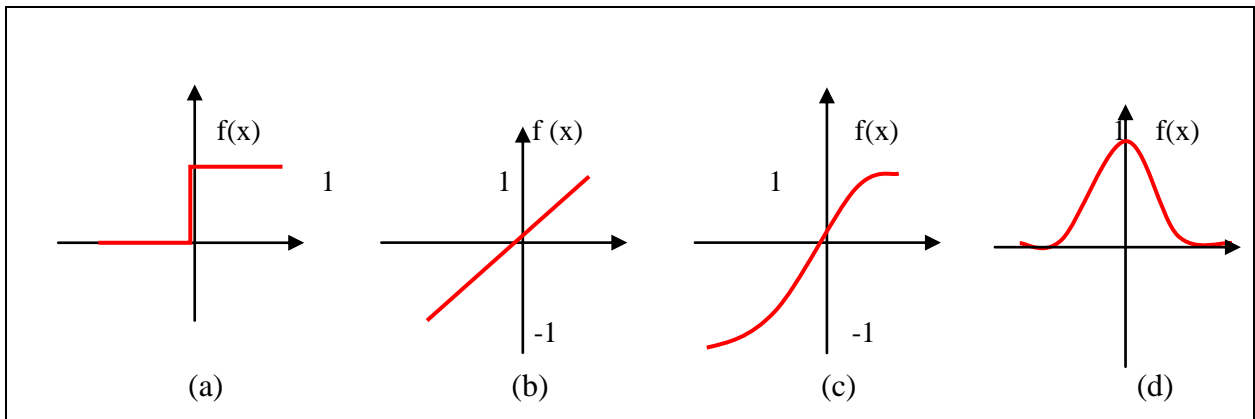




Figure IV.3: Exemple des fonctions de transfert : (a) seuil, (b) linéaire, (c) sigmoïde et (d) Gaussienne.

Les différentes fonctions d'activation appliquée dans RNA

Nom de la fonction	Relation entrée/ sortie	Icône	Nom MATLAB
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 positive	$y = 0$ si $s \leq 0$ $y = s$ si $s \geq 0$		poslin

Sigmoïde	$y = \frac{1}{1+e^{-x}}$		logsig
Tangente hyperbolique	$y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$		tansig

TabIV.1. Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.[27]

IV .2 .3 Les réseaux de neurones artificiels

IV .2 .3.1 Définition

Les Réseaux de Neurones Artificiels sont des modèles statistiques adaptatifs, basés sur une analogie avec le cerveau humain. Leur adaptabilité revient du fait qu'ils peuvent apprendre à estimer les paramètres d'un ensemble de données en utilisant un nombre d'exemples. Dans sa structure de base, un Réseau de Neurones Artificiels est constitué d'un ensemble d'unités simples qui sont les neurones. Ces dernières sont interconnectées à l'aide d'un ensemble de connexions pondérées, chaque unité correspond à une caractéristique d'une forme à analyser [30]

IV .2 .4 Architecture des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones se distinguent en deux grandes familles :

- Les réseaux non bouclés (statique).
- Les réseaux bouclés (dynamique).

IV.2.4.1 Les réseaux non bouclés

✓ Le perceptron monocouche

Le perceptron monocouche qui contient une couche d'entrée et une couche de sortie (c'est la seule couche active d'où le terme de monocouche). Il est calqué, à la base, sur le système visuel. Utilisation: reconnaissance des formes, classification, opérations logiques simples («ET» ou «OU») [31]

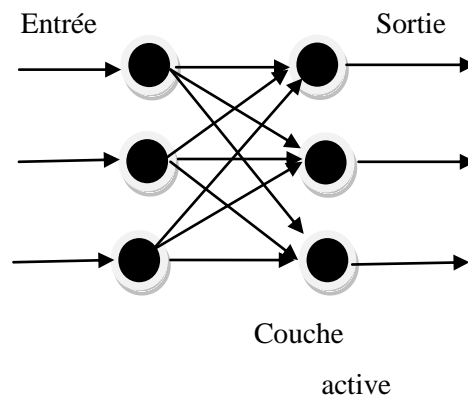


Figure IV.4 perceptron monocouche

✓ **Le perceptron multicouche.**

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. [26]

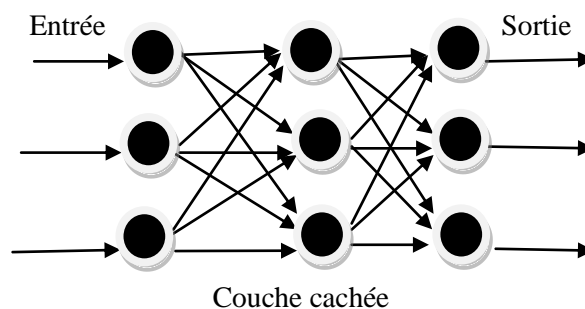


Figure IV.5 : perceptron multicouche[25].

IV.2.4.2 Réseaux bouclés

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions

quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties.[27]

Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network)

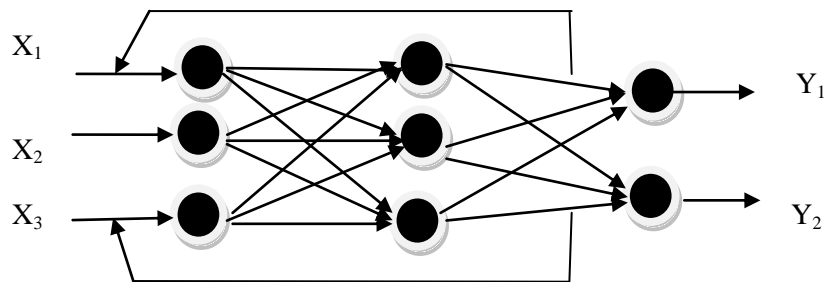


Figure IV.6 : Réseau bouclé [25]

IV.2.5 L'apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est l'objectif principal du développement de modèles dans les réseaux de neurones bas. Ceci a été réalisé en ajustant les poids de la connexion réseau, généralement par des algorithmes spécifiques, afin d'obtenir des valeurs optimales appropriées à ces poids. A la fin de cette opération on converge vers un fonctionnement de réseaux, le plus possible adapté au problème qu'on désire résoudre, toute on fournissant un certain nombre d'exemples d'apprentissage (base d'apprentissage).

L'apprentissage mathématique, basé sur ce concept, sert à minimiser une fonction de coûts formulée autour de l'erreur de sortie. Alors l'adaptation commence, par les neurones de la couche de sortie, forcés de la bonne valeur, puis on fait varier légèrement les poids des neurones des couches précédentes :

Il y a autant d'algorithmes d'apprentissage que de types de réseau. Mais la question qui se pose, est ce que on est absolument sûr de la stabilité du réseau ? Question classique qui revient assurer la convergence des algorithmes d'apprentissage utilisés. [25]

Les procédures d'apprentissage peuvent se subdiviser, elles aussi, en deux grandes catégories.

IV.2.5.1 Apprentissage supervisé

Dans ce cas, il est nécessaire de connaître le pré réglage de sortie souhaité. Le vecteur d'entrée est présenté à la grille et sa sortie est ensuite calculée. Ces dernières seront

comparées aux sorties souhaitées et les poids sont ajustés pour réduire la différence entre eux. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le critère de performance soit satisfait.

L'apprentissage supervisé détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur a associé des réponses ou des cibles désirées également étiquetées et grâce à une stratégie spécifique. Après la phase d'apprentissage et la convergence des calculs, il n'est plus nécessaire.

En général, de mémoriser le jeu d'apprentissage. Ces algorithmes sont particulièrement dédiés aux problèmes de classification des données bruitées ou incomplètes. [25]

IV.2.5.2 Apprentissage non supervisé

Ne nécessite pas « d'enseignant » externe et se base uniquement sur les valeurs d'entrée sans fournir de réponse désirée. Le réseau s'organise pour améliorer la fonction de coût.

L'apprentissage non supervisé copie le fonctionnement du cerveau humain qui retrouve les informations par association. Lorsque vous entrez dans le réseau, des exemples connus sont présentés et le même réseau est organisé par l'attracteur qui correspond aux configurations statiques du modèle dynamique non linéaire connecté au réseau.

L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent le poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties. [25]

IV.2.6 Les principales règles d'apprentissage

Les stratégies des modifications des poids synaptiques sont dérivées des règles générales suivantes :

- La règle de HEBB ou les poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si les deux processeurs élémentaires sont activés simultanément.
- La règle de WIDROW HOFF ou règle delta règle ou les poids synaptique est adaptée pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée.
- L'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules des neurones.

La figure (IV.7) représente la cellule émettrice P_j connectée à la cellule réceptrice P_i par l'intermédiaire du poids synaptique w_j

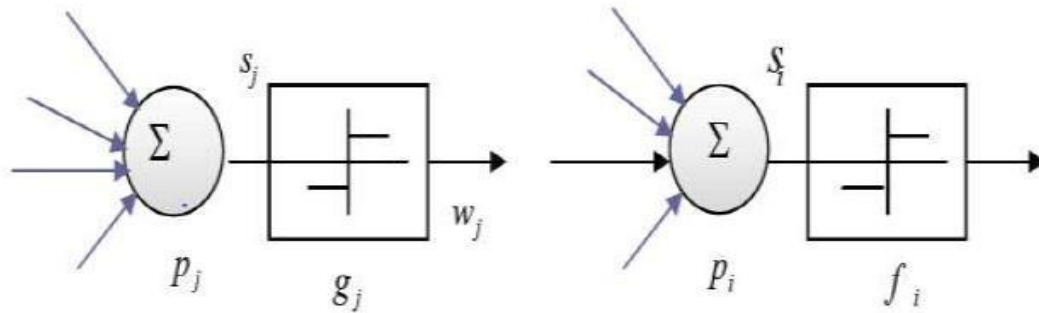


Figure IV.7 : Modèle d'apprentissage de la connexion w_j entre deux neurones

$$\Delta w_{ij} = \alpha f_i(S_i, t_i) g_j(S_j, w_{ij}) \quad (\text{IV.11})$$

Avec :

α : le pas d'adaptation

f_i et f_j : fonctions d'activations de P_i et P_j .

S_i et S_j : valeurs d'activations de P_i et P_j .

t_i : entrée professeur de P_i .

Dans la règle de HEBB, il n'y a pas de professeur et les fonctions f_i sont linéaires : le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta w_{ij} = \alpha S_i S_j \quad (\text{IV.12})$$

La règle de WIDROW HOFF, connue également sous le nom de Delta règle (ou Δ règle) nécessite un professeur et se formule en présence de fonctions d'activation linéaire sous la forme

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - S_i) S_j \quad (\text{IV.13})$$

Le modèle compétitif de type KOHONEN met en œuvre l'expression :

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - w_{ij}) \quad (\text{IV.14})$$

Après la phase d'apprentissage, toute la mémorisation des connaissances est gravée dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexionniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie.[25]

IV.2.7 Application des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones ont une grande capacité à comprendre et à extraire Règles et tendances de données complexes, bruitées et imprécises. Ils peuvent s'utiliser pour extraire des modèles et détecter des tendances reposant sur des fonctions mathématiques compliquées qui sont trop difficiles, voire impossible, à modéliser à l'aide de techniques analytiques ou paramétriques traditionnelles.

Les réseaux de neurones servent dans aujourd'hui à toutes sortes d'applications dans divers domaines. On peut citer par exemples :

- Autopilotage des avions.
- Système de guidage des automobiles.
- Lecture automatique des chèques bancaires et d'adresses postales.
- Les réseaux de neurones sont utilisés aussi pour les systèmes de vision par ordinateur.
- Ils sont utilisés en robotique et en télécommunication.
- Ils sont aussi utilisés dans les domaines de finance.
- Ils sont utilisés pour le diagnostic médical.
- Production des systèmes de traitement signal et pour la synthèse de la parole.[32]

IV.2.8 Avantages et Inconvénients des réseaux de neurones

IV.2.8.1 Avantages des réseaux de neurones

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe
- 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 [32].

IV.2.8.1 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 boites noires où les connaissances Sont inintelligibles pour l'utilisateur [32].

IV.3 Contrôle de GSAP par RNA

L'idée consiste a remplacer les trois régulateurs PI de la commande vectoriel par des régulateurs neuronaux simple, pour l'apprentissages, nous utilisons l'algorithme de rétro-propagation.

Chaque réseau de neurones remplit une fonction bien définie dépendant de l'architecture choisie. le problème est de trouver une structure qui donne de meilleurs résultats. pour cela, plusieurs essais pour déterminer l'architecteur optimale du réseau.

Les boucles de régulation neuronale se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la Figure (IV. 8), (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q).

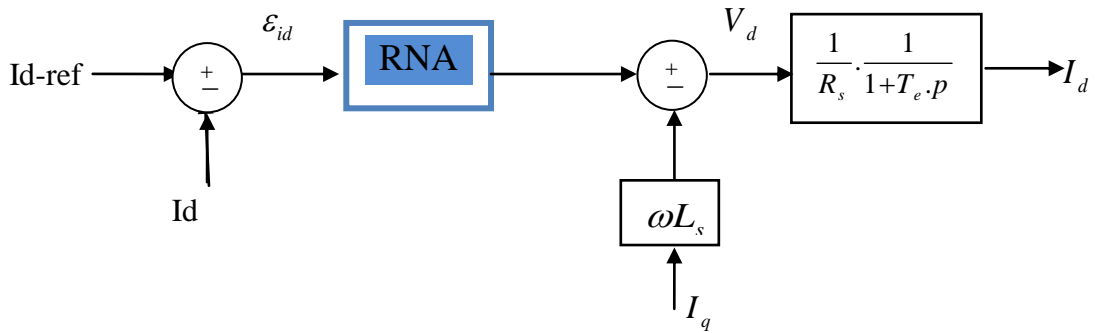


Figure IV.8 : Boucle de régulation de courant

La figure (IV.9) illustre la stratégie de commande en couple par RNA, elle comporte les boucles de régulation de courants et le découplage des tensions.

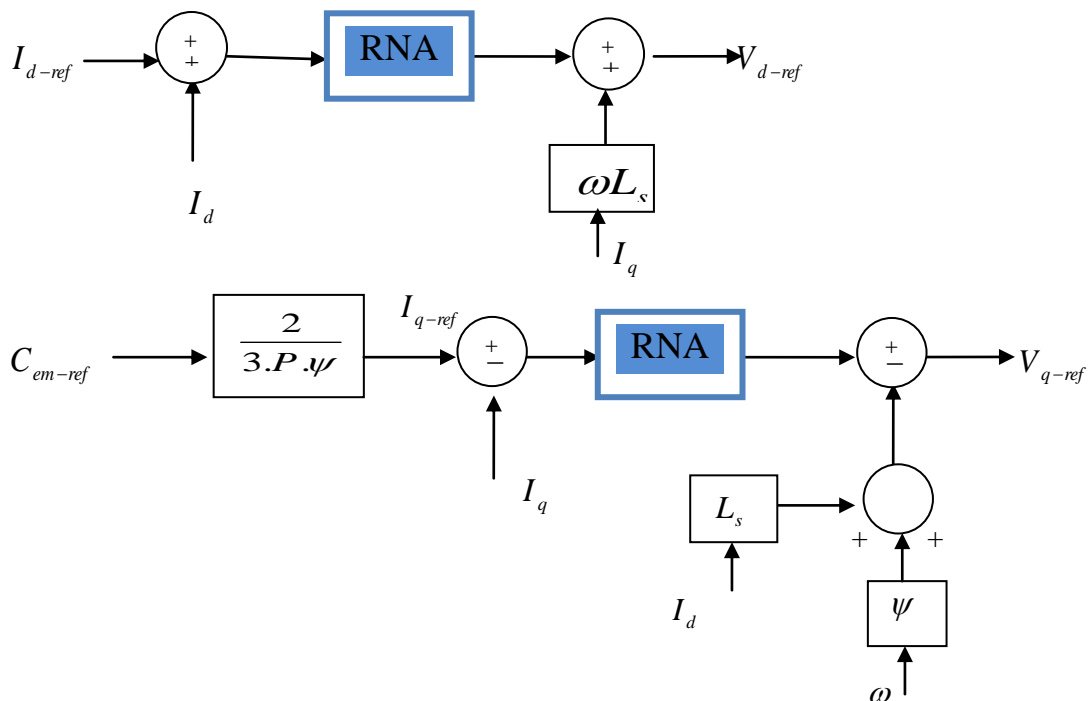


Figure IV.9 : stratégies de commande en couple de GSAP

IV.3.1 Structure complète de contrôle vectoriel de GSAP par R

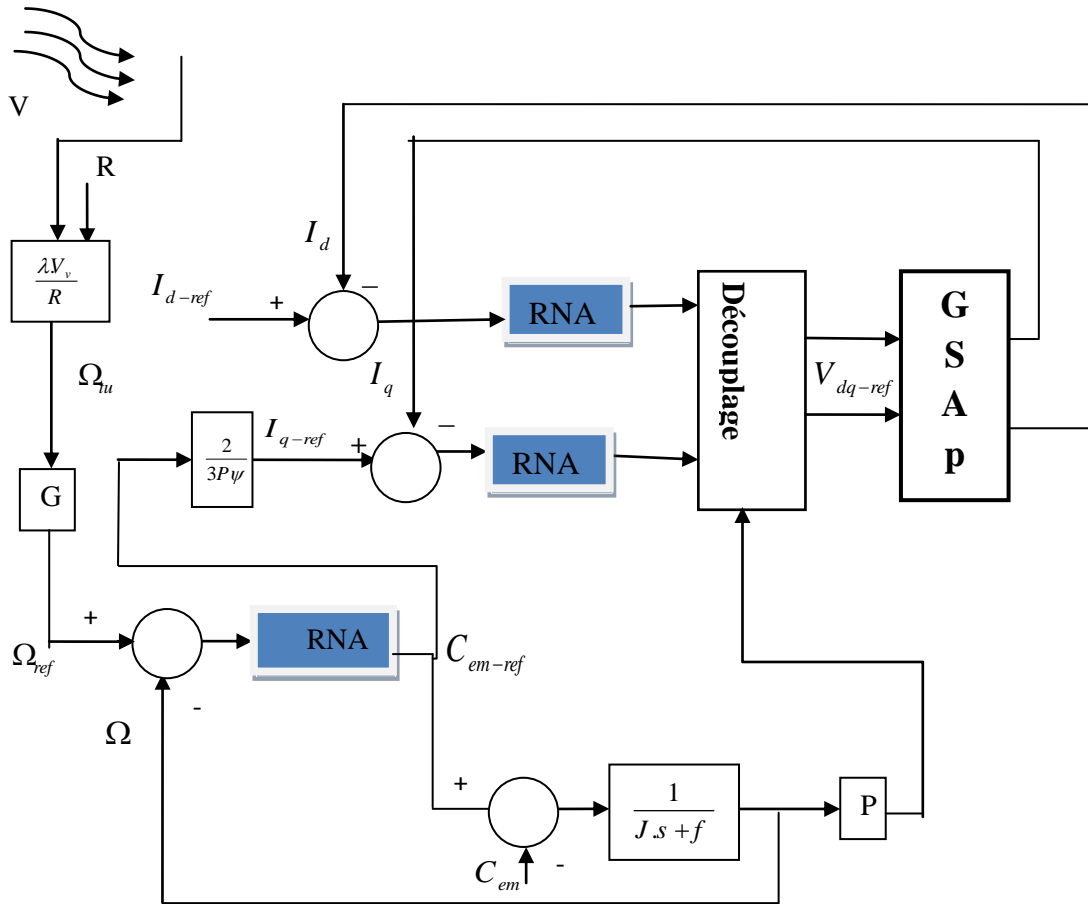


Figure IV.3: Schéma complet de commande vectorielle de GSAP par RNA

IV.3.2 Résultats de simulation de la commande par RNA

La commande adoptée est basée sur la méthode par RNA appliqué à une GSAP.

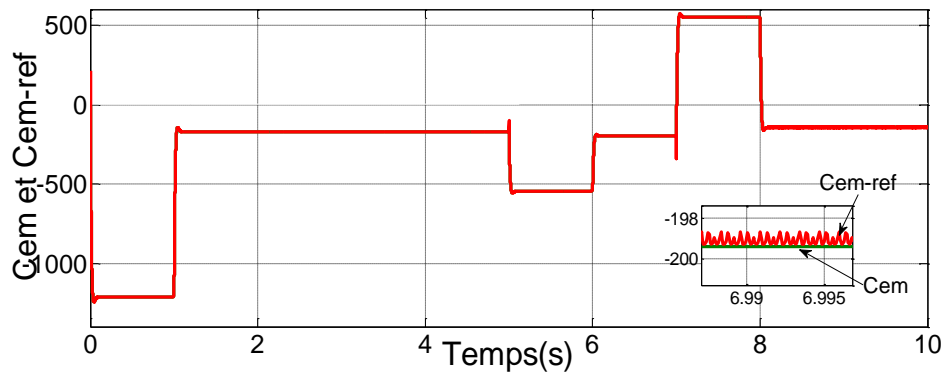
IV.3.2.1 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est constante

Commentaire

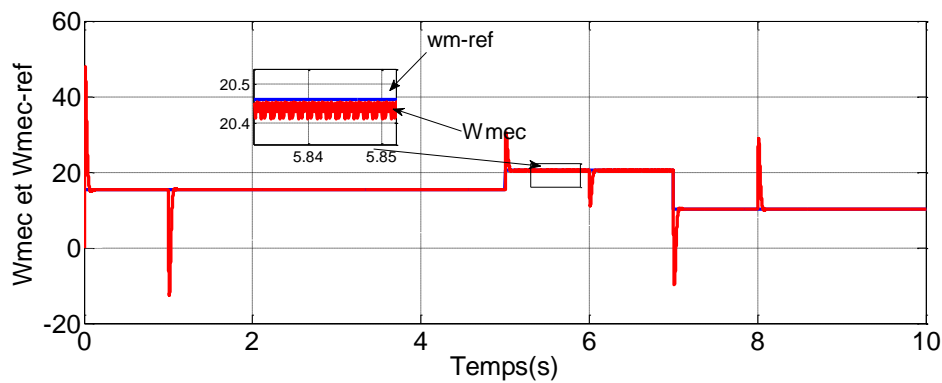
Dans ce cas nous avons donné une valeur pour chaque durée en utilisant step, on peut voir sur la figure. La courbe de vitesse montre une bonne réponse de la MSAP. Le couple électromagnétique suit bien le courant Iq avec un pic lié au démarrage, qui s'atteint dans le régime permanent après 1sec, ce qui montre l'objectif de la commande par réseaux de neurone

L'application de résultats d'apprentissage permet d'obtenir une bonne performance sur les courants, qui a une forme sinusoïdale et ne présente pas d'ondulations et d'oscillations sur l'amplitude, et la valeur efficace est constante.

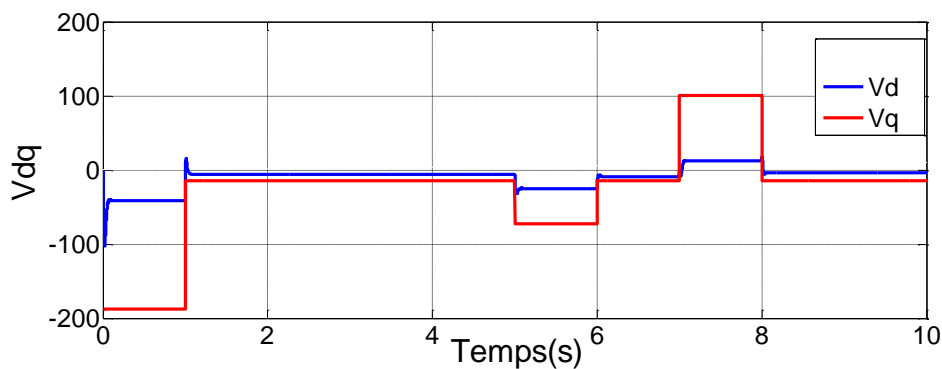
Les figures suivant présentent le résultat de commande par RNA pour une vitesse de vent constante :



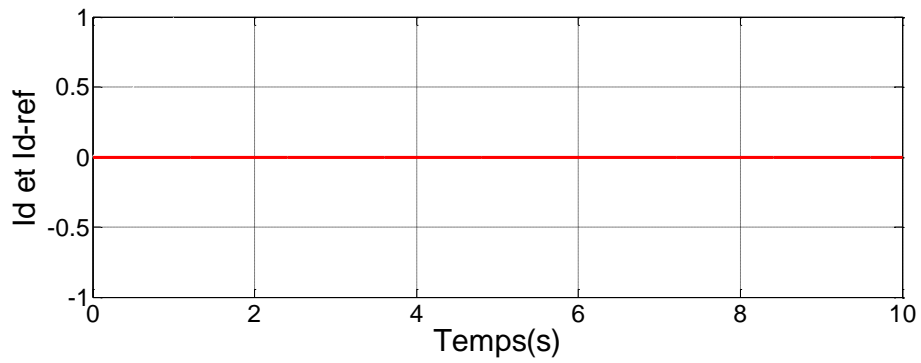
a : les couple C_{em} et C_{em-ref} (N /m)



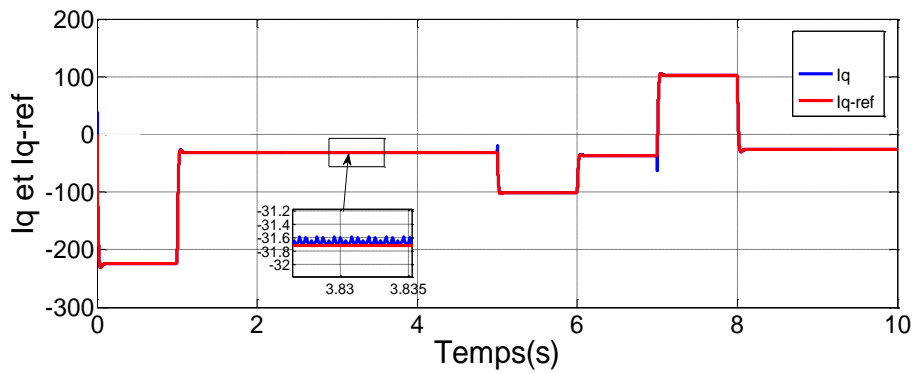
b ; la vitesse de rotation (rad/s)



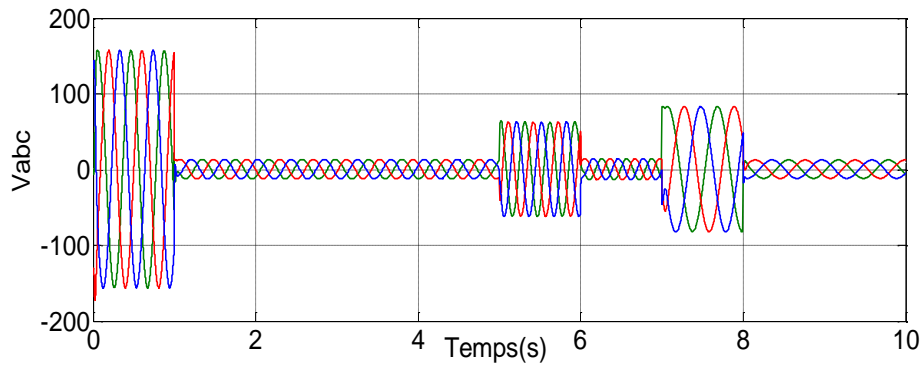
c : la tension V_{dq} (V)



d : le courant I_d et I_{d-ref} (A)



e : le courant I_q et I_{q-ref} (A)



f : les tension V_{abc} (V)

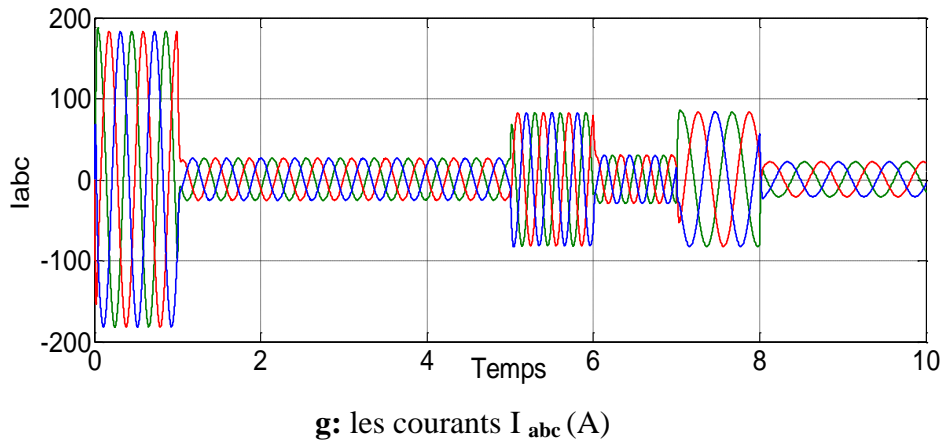


Figure IV.11 : Résultat de simulation GSAP a vitesse de vent constante

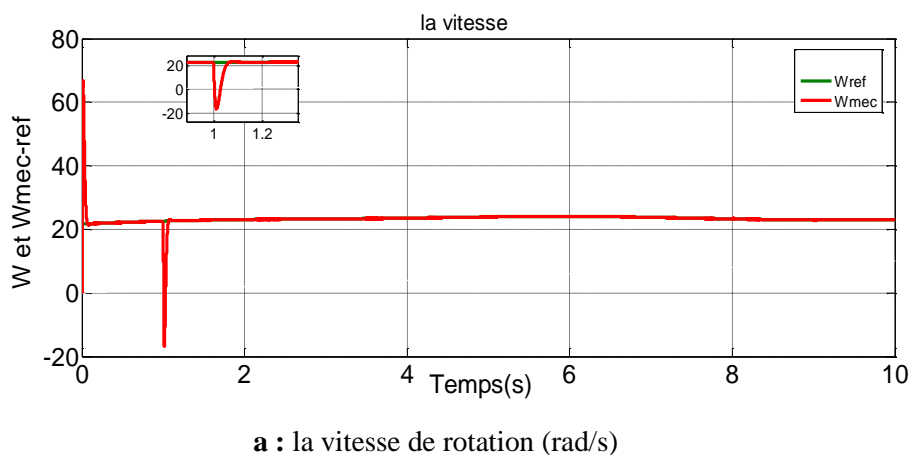
IV.3.2.2 simulation de GSAP pour la vitesse de vent est variable

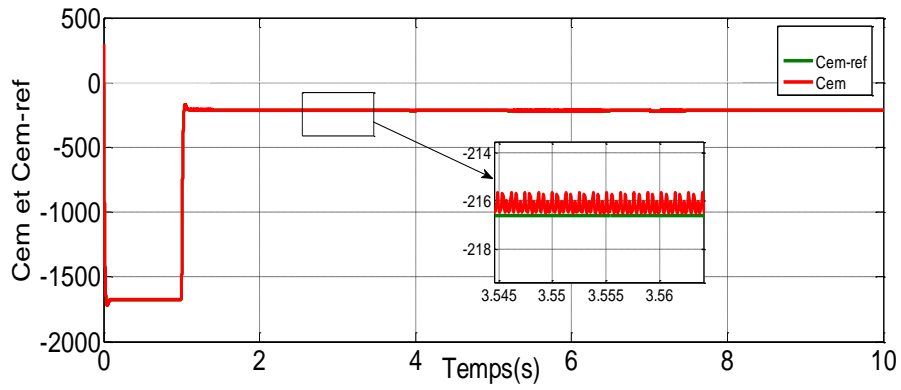
Pour la variation de vitesse de vent on a remarqué, l'application de réseau de neurone dans ce cas nous donne le meilleur performance sur la vitesse, le couple électromagnétique, le courant.

Le courant, qui a une forme sinusoïdale et ne présente pas d'ondulations et d'oscillations sur l'amplitude, et la valeur efficace est constante.

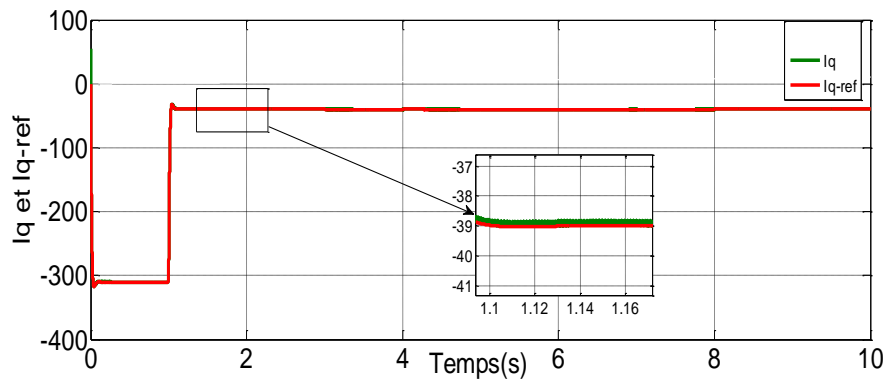
La courbe de vitesse montre une bonne réponse de la MSAP

Les figures suivant présentent le résultat de commande par RNA pour une vitesse de vent variable :

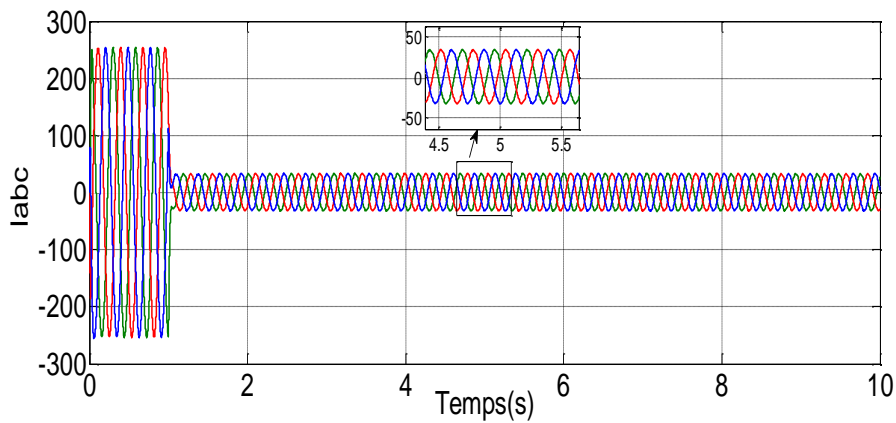




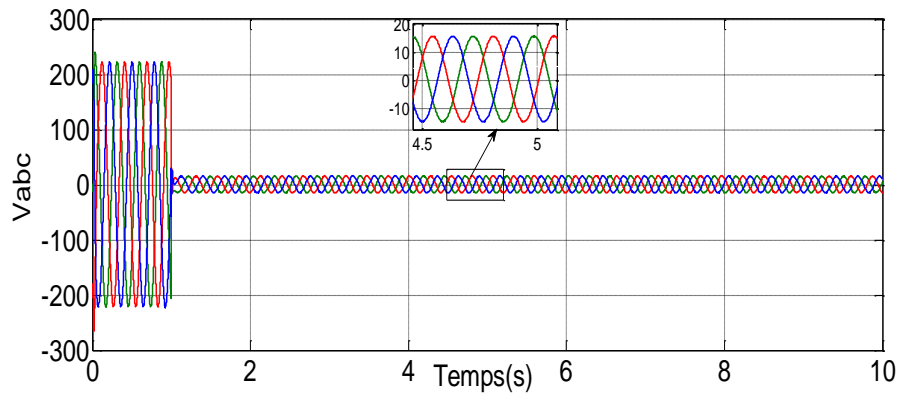
b : les couple C_{em} et C_{em-ref} (N/m)



c : le courant I_q et I_q-ref (A)



d: les courants I_{abc} (A)



e: les tension V_{abc} (V)

Figure IV.12 : résultat de simulation GSAP a vitesse de vent variable

IV.5 Comparaison entre deux commandes

D'après le résultat de simulation de la commande de GSAP, il y a une petite amélioration en qualité de forme d'onde par la régulation neuronale.

la comparaison entre les deux correcteurs montre que le régulateur neuronal présente de bonnes performances, Par contre, pour le régulateur PI, ses performances sont totalement détériorée.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les réseaux de neurones, et l'application de cette commande sur de GSAP par réseaux de neurone.

On a remplacé les régulateur PI par un contrôleur neuronal. Les résultats obtenus sont améliorés les performances dynamique et statiques (le temps de réponse, les ondulations) de la GSAP a ceux apportés par la régulation classique. La régulation et devenue plus simple et plus souple avec les réseaux de neurones.

Conclusion générale

Les exigences de plus en plus pointues de la technologie ont fait que les machines à aimant permanent sont de plus en plus utilisées plus particulièrement dans des applications industrielles exigeantes en encombrement et en puissance et aussi dans la production de l'énergie électrique.

le travail effectué dans ce mémoire est la commande de la génératrice synchrone a aimant permanent pour étudier les performances et robustesse des correcteurs :PI et Neuronal

Nous avons traité la problématique de la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en se basant sur le modèle de Park et les équations électromagnétiques et mécaniques régissant le comportement dynamique de la MSAP en tenant compte des hypothèses simplificatrices. .

Dans ce travaille on a étudier les différentes stratégies de commande

Premièrement, la régulation est faite avec des régulateurs PI. deuxièmement, la commande a base de réseaux de neurones.

La commande vectorielle et ses principales stratégies à courant direct nul basé sur un régulateur classique PI a été étudiée. Suite au test de robustesse il apparaît que le réglage de la vitesse par PI n'est pas robuste face aux variations paramétriques de la machine , et en particulier de la variation avec la température .

La commande par réseau de neurone améliorés les performances dynamique et statiques de la GSAP a ceux apportés par la régulation classique.

- [1] **M.BELABED,T.BENYAHIA** «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents», thèse de Master ,Université Dr . Tahar Moulay de Saïda 2015.
- [2] **F. MAZOUZ**, «Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents», thèse de magistère, Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna, 2013.
- [3] **M. MAYOUF**, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », thèse de magistère , Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna, 2007.
- [4]**H .BENSAADI**, « Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.
- [6] **H.MESLOUB** « Commande DTC Prédicative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents »,Université Mohamed Khider – Biskra ,2016
- [5] **Cimuca GO**, « système inertiel de stockage d'énergie associé a des générateurs éoliens », Thèse de doctorat, L'école National Supérieur d'Arts et Métiers Centre de Lille, N 2005-27, 2005.
- [8] **N.BOUNASLA**, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», Université Ferhat ABBAS Sétif ,2014.
- [7] **A.Hamichi , F. Benkerrou** « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent », Mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2014/2015
- [8] **N.BOUNASLA**, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», Université Ferhat ABBAS Sétif ,2014.
- [9] **F.LOUAR** «Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent» thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba ,2016.
- [10] **H.AID,W. AINA**, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents » Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen2012 – 2013
- [11] **F .BENCHABANE** «Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring »,Mémoire de Magister,Université Mohammed Khider De BISKRA,2004/2005.
- [12] **E .BOMMÉ** «Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer» Thèse de Doctorat de L'Institut polytechnique de Grenoble, 2009.

- [13] **M.L.LATRECHE**, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» Mémoire de Magister , Université Ferhat Abbas de Sétif 2012 .
- [14] **F. ZAIDI** , « modélisation des machines synchrones a double excitations » », Mémoire de Master Université de Mohamed boudiaf-m'sila, 2015/2016.
- [15] **M. MAYOUF** «**ETUDE** comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents » Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna 2014
- [16] **N.SENHADJI, A.CHALABI** «Commande Du Moteur Synchrone A Aimants Permanents Par Backstepping», Mémoire de Master Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2015
- [17] **S.Mme HAMECHA, Ep.BOUREKACHE**« Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents» Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013
- [18] **N. Laverdure**, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.
- [19] **F.DIONE** , «étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne a base de machine synchrone a aimants permanents» Mémoire de master Université d'annaba 2018
- [20] **I. Meghlaoui** «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal» Mémoire de magister Université Badji Mokhtar –annaba,2009.
- [21] **S.E. ZIRAOUI** «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau »Mémoire de master Université Badji Mokhtar –annaba 2017
- [22]**S.ZEGHOUDI**,« Commande Par Passivite De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master , Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen,2015.
- [23] **I.Touaimi Med ,A.Douaer Med**,« Commande Par Passivite De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master , Université de Djilali BOUNAÂMA Khemis Miliana– Tlemcen,2016/2017.
- [24] **L. Allali** , « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », Mémoire de master, université labri ben m'hidi d'oum el bouaghi,2015/2017.
- [25]**B. RAKZA, S. OUANAS**, « modélisation et commande du système photovoltaïque par les réseaux de neurones ».mémoire de master, Université de m'sila 2016/2017
- [26]**D.KADOUS** ,« utilisation des réseaux de neurones comme outil du datamining: génération de modèle comportemental d'un processus physique a partir de données ».mémoire de master, Université Abdou-bakr belkaid de Tlemcen 2012

- [27] **S. MASSOUM**, « contrôle avec les technique de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne a base d'une machine asynchrone a double alimentation ».mémoire doctorat LMD, Université djillali liabes de sidi-bel-abbes
- [28] **Z. ASRADJ** « identification des systèmes non linéaire par les réseaux de neurones ».mémoire de magister, Université Abderrahmane mira- Bejaia
- [29] **F. BELLOUAZANI**, « commande par réseaux de neurones d'un onduleur a haute fréquence destiné a la table de cuisson par induction ».mémoire de magister, Université HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF 2002
- [31] **Y.HAMMOUCHE** « comparaison de plusieurs méthode pour la prédiction le la charge électrique nationale »,mémoire de magister, Université BADJI MOKHTAR ANNABA 2009
- [30] **M. ZIANI ,A. ZOUMA** ,« Détection automatique et sélection des variable pertinentes de la maladie de parkinson par un système neuro-génétique a deux phases d'apprentissage»,mémoire de master, Université Belhadj bouchaib d'Ain-Temouchent 2016/1017
- [32] **B.D.Habiboullah,B.Ladjedel** ,« Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la vitesse de vent »,mémoire de Master, universite mohamed boudiaf - m'sila,2017/2018

Annexe

Paramètre de la machine synchrone a aiment permanent :

Nome et symbole des paramètres	Valeur
La puissance nominal P_n	1.5 KW
La tension nominal U_n	220V
la résistance des phases statoriques R_s	2.875 Ω
l'inductance directe L_d	$L_d = 0.012H$
l'inductance quadrature L_q	$L_q = 0.0211H$
moment d'inertie total de la machine J	$J = 0.00141Kg \cdot m^2$
coefficient de frottement visqueux f	$f = 0.001Nm/rd/s$
le nombre de paires de pôles P	P=4
le flux d'excitation des aimants Ψ_f	$\Psi_f = 0.175Wb$
la résistance de charge R_{ch}	$R_{ch} = 50\Omega$
L'inductances de charge L_{ch}	$L_{ch} = 0.002H$

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : **RE**

Proposé et dirigé par : **PR. Sabir MESSALTI**

Dr. Abderrahim ZEMMIT

Présenté par : Mr. **Theldja MERZOUGUI**

Khedidja ABDELKEBIRE

Thème :

**Commandes d'une génératrice synchrone à aimant
permanant**

Résumé :

Ce mémoire consacré la commande de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP). En premier lieu, nous avons présenté des notions fondamentales et le principe de fonctionnement de la machine synchrone a aimant permanent. Puis, nous avons présente la modélisation de GSAP. montre la commande de GSAP vectorielle de GSAP en utilisant des régulateurs PI classiques présente certains inconvénients tels que la sensibilité aux incertitudes paramétriques de la machine et leurs variations. Pour améliorer les performances du système à commander, nous avons appliqué une autre technique de réglage robuste dite la commande par les réseaux de neurone (RNA).les performance et la robustesse sont analysées par simulation a base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés :

Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), Modélisation, Commande vectorielle, Régulateurs PI, Réseaux de neurones artificiels .