

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électrotechnique
Spécialité Machines Electriques

présenté par

Ould Aklouche Hani

OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE REGULATION DE TENSION PAR PSO. APPLICATION A UNE CENTRALE ELECTRIQUE

Proposé par : M^{me} Boudissa E. & M^r Bounekhla M. & M^r Berra B.

Remerciements

Qu'il me soit tout d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

Je suis très reconnaissant à Madame E. Boudissa et à Monsieur M. Bounekhla pour avoir accepté de diriger ce travail, et pour leurs encouragements et leurs soutiens qui m'ont été d'une aide précieuse, leur encadrement et surtout les conseils avisés qu'ils m'ont prodigués, témoignent de ses qualités scientifiques et humaines.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur B. Berra pour sa disponibilité, son aide, ses conseils et l'opportunité qui m'a donné en me permettant de réaliser mon stage pratique au sein de la centrale dans les meilleures conditions.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont apportés leur aide pour la réalisation de ce travail et toutes des personnes qui ont partagé leurs connaissances pour me permettre d'avancer dans mon travail y compris monsieur A.Kheldoun.

Je remercie les membres du jury, qui ont eu l'amabilité d'examiner ce document et d'évaluer son contenu.

Dédicace

A mes très chers parents pour leur amour, leur confiance, leur sacrifice, et leur grand soutien tout au long de mes études.

A mes grands parents pour leur soutien et leur présence.

A mon oncle Mohamed et ma tante Ghania spécialement.

A mes frères Adel, Fouad, Abd-Ennouret mes cousins.

A Saad Allah, Adlane, Youcef, Sofiane, Mohamed, Hocine, Rahim, Bilal et tous mes chers amis.

A mes camarades de classe.

A toute la famille Ould Aklouche et Ahfir.

A la mémoire de ma grand-mère puisse Dieu l'accueillir dans son infinie miséricorde.

A tous ceux qui me sont chers, qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma reconnaissance et gratitude.

نهدف من خلال مذكرة التخرج الى تحسين عملية تنظيم التوتر الكهربائي وذلك باستعمال تقنية ذات طابع عشوائي قصد تطبيقها في محطة توليد الكهرباء. المولد الكهربائي عنصر أساسي في أنظمة توليد الكهرباء. في اغلب الأحيان يكون المولد عبارة عن محرك تزامني يعمل بصيغة مولد. النمذجة الرياضية للمحرك التزامني ذو الدوار الملولب في صيغة مولد سمحت لنا بمتابعة التوتر الصادر من المولد الحمولة المتمثلة في وشيعة موصولة بتوصيل نجمة. لحل مشكلة هبوط التوتر، تم استعمال نظام التنظيم. عملية تحديد خصائص المنظم تمت عن طريق خوارزمية التطوير بأسرب المجسمات.

كلمات المفاتيح: مولد كهربائي تزامني ذو دوار ملولب، مولد كهربائي، نظام تنظيم التوتر، التطوير بأسرب المجسمات

Résumé

L'objectif du mémoire est l'optimisation d'un système de régulation de tension par une méthode stochastique (PSO) pour une éventuelle application à une centrale électrique. L'alternateur est l'élément clé dans la production électrique. L'alternateur est généralement une machine synchrone fonctionnant en mode générateur. La modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné en mode générateur a permis de suivre la tension de sortie en fonction de la charge inductive couplée en étoile. Pour remédier à la chute de tension, la régulation a été impliquée. La détermination des paramètres du régulateur est réalisée par le développement de l'algorithme d'essaims particuliers (particle warm optimisation PSO).

Mots clés : machine synchrone, générateur, régulation de tension, PSO

Abstract

The aim of this work is the optimization of a voltage regulation system using a stochastic method (PSO) for an application on a power plant. A generator is the main part when in the electricity production field. An alternator in the most of the time is a synchronous machine running on the generation mode. The modelling of a wound rotor synchronous machine in generator mode allowed us to analyse the output voltage according to an inductive load coupled in star configuration. To solve the problem of voltage drop, regulation was involved. The regulator's parameters are determined by developing the particle swarm optimization algorithm.

Keywords: wound rotor synchronous generator, generator, voltage regulation, PSO

Listes des acronymes et abréviations

| | |
|-----------------|---|
| MSRB | : Machine synchrone à rotor bobiné |
| SKH | : Shariket Kahraba Hadjret Ennous |
| MS | : Machine synchrone |
| MSAP | : Machine synchrone à aimant permanent |
| ω_e | : Pulsation électrique. |
| ω_r | : Pulsation rotorique. |
| Ω | : Vitesse de rotation en rad/s |
| f.m. m | : Force magnétomotrice. |
| IEEE | : Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens. |
| V_a, i_a | : Tension et courant de la phase 'a'. |
| V_b, i_b | : Tension et courant de la phase 'b'. |
| V_c, i_c | : Tension et courant de la phase 'c'. |
| V_f, i_f | : Tension et courant de l'enroulement rotorique. |
| V_D, i_D | : Tension et courant d'amortisseur D. |
| V_Q, i_Q | : Tension et courant d'amortisseur Q. |
| P | : Matrice de Park |
| P ⁻¹ | : Matrice de Park inverse |
| D | : Amortisseur sur l'axe 'd' |
| Q | : Amortisseur sur l'axe 'q' |
| P(t) | : Puissance instantané |
| W_{elec} | : Energie électrique absorbée |
| C_{em} | : Couple électromagnétique |
| $C_{rél}$ | : Couple réluctant |
| C_{asyn} | : Couple asynchrone |
| C_{syn} | : Couple synchrone |
| R_{ch} | : Résistance de la charge alimentée par l'alternateur |
| L_{ch} | : Inductance de la charge alimentée par l'alternateur |
| i_{dc} | : Courant de Park suivant l'axe 'd' traversant la charge |
| i_{qc} | : Courant de Park suivant l'axe 'q' traversant la charge |
| PSO | : Particles warm optimization (optimisation par essais particulaires) |

Tables des matières

| | |
|--|----|
| Introduction Générale | 1 |
| Chapitre1 Production d'énergie électrique | 3 |
| 1.1 Introduction..... | 3 |
| 1.2 Technologies de production de l'énergie électriques | 3 |
| 1.2.1 Centrales hydrauliques | 4 |
| 1.2.2 Centrales thermiques Nucléaires..... | 5 |
| 1.2.3 Centrales thermiques à flamme :..... | 5 |
| 1.2.4 Technologies nouvelles :..... | 8 |
| 1.3 La centrale thermique à cycle combiné Hadjret Ennous : | 9 |
| 1.3.1 Alternateur :..... | 11 |
| 1.3.2 Turbine à gaz 9FB :..... | 15 |
| 1.3.3 La Turbine à vapeur A15 : | 16 |
| 1.3.4 La Chaudière de récupération HRSG : | 16 |
| 1.3.5 Le condenseur : | 17 |
| 1.4 Conclusion : | 17 |
| Chapitre2 Modélisation de la MSRB | 18 |
| 2.1 Introduction..... | 18 |
| 2.2 La machine synchrone | 18 |
| 2.2.1 Classification des machines synchrones | 19 |
| 2.2.2 Le principe de fonctionnement..... | 21 |
| 2.3 La mise en équations | 21 |
| 2.4 Modèle (abc) de la machine synchrone | 22 |
| 2.4.1 Equations des tensions | 23 |
| 2.4.2 Expressions des flux..... | 24 |
| 2.5 Transformée de Park dq0..... | 26 |
| 2.5.1 Equations des tensions | 27 |
| 2.5.2 Equations de flux..... | 28 |
| 2.6 Equation du couple..... | 30 |
| 2.7 Alternateur en charge | 31 |
| 2.8 Simulation..... | 32 |
| 2.9 Conclusion | 36 |

| | |
|---|----|
| Chapitre3 Régulation en tension | 37 |
| 3.1 Introduction..... | 37 |
| 3.2 Régulation de vitesse de rotation | 38 |
| 3.3 La régulation de la tension | 38 |
| 3.3.1 Le principe de fonctionnement d'un système d'excitation | 39 |
| 3.3.2 Les différents types de système d'excitation | 41 |
| 3.3.3 régulation de tension et de puissance réactive..... | 43 |
| 3.4 Le système de régulation de tension proposé | 44 |
| 3.4.1 Modélisation du système de régulation | 45 |
| 3.4.2 Les principaux types des régulateurs (correcteurs)..... | 46 |
| 3.4.3 Les performances d'un système asservis..... | 46 |
| 3.4.4 Les correcteurs PI, PD, PID | 47 |
| 3.5 Conclusion | 48 |
| Chapitre4 Optimisation et simulation | 49 |
| 4.1 Introduction..... | 50 |
| 4.2 Algorithme d'essais particuliers | 50 |
| 4.2.1 Développement de l'algorithme d'essais particuliers | 52 |
| 4.3 Optimisation du régulateur par PSO | 53 |
| 4.4 Résultats de simulation | 53 |
| 4.5 Conclusion | 56 |
| Conclusion Générale..... | 57 |

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique

Figure 1.2. Schéma de principe d'une centrale nucléaire

Figure 1.3. Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné multi arbres

Figure 1.4. Schéma de fonctionnement d'une éolienne

Figure 1.5. Taux de production par producteur en Algérie 2011

Figure 1.6. Schéma du fonctionnement de la centrale à cycle combiné Hadjret Ennous

Figure 1.7. Un schéma qui montre l'emplacement de l'alternateur sur l'arbre du cycle combiné

Figure 1.8. Plaque signalétique de l'alternateur 450H

Figure 1.9. Structure du stator

Figure 1.10. Tôles laminés

Figure 1.11. Les barres statoriques

Figure 1.15. Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

Figure 1.14. Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Figure 1.13. Borne de connexion du courant d'excitation (charbon)

Figure 1.12. Rotor d'un turboalternateur

Figure 2.1. Rotor munis des amortisseurs

Chapitre 2

Figure 2.2. Rotor bobiné à pôles saillants

Figure 2.3. Rotor bobiné à pôles lisses

Figure 2.4. Définition des différents enroulements d'une machine synchrone

Figure 2.5. Circulation du champ statorique.

Figure 2.5. Variation de la perméance magnétique en fonction de l'angle θ

Figure 2.6. Décomposition de 'fa' selon axe-d et axe-q

Figure 2.7. Représentation schématique d'une machine synchrone dans le repère de dq0.

Figure 2.8. La tension de sortie du générateur 'phase a' avec la charge 1

Figure 2.9. La tension de sortie du générateur 'phase b' avec la charge 1

Figure 2.10. La tension de sortie du générateur 'phase c' avec la charge 1

Figure 2.11. La tension de sortie du générateur 'phase a' avec la charge 2

Figure 2.12. La tension de sortie du générateur 'phase b' avec la charge 2

Figure 2.13. La tension de sortie du générateur 'phase c' avec la charge 2

Figure 3.4. Le système de régulation étudié

Figure 3.3. Schéma d'un système de régulation de tension

Figure 3.1. Principe de fonctionnement d'une excitation avec diodes tournants

Figure 3.1. Système typique de production d'énergie électrique

Chapitre 3

Figure 3.1. Schéma d'un système de régulation de tension

Figure 3.2. Système de régulation étudié

Chapitre 4

Figure.4.1. Constitution d'une particule d'essaim

Figure.4.2. Déplacement d'une particule d'essaim

Figure.4.3. Organigramme du PSO

Figure.4.4. Evaluation d'un régulateur

Figure.4.5. Tension de référence imposée par l'opérateur

Figure.4.6. Tension efficace mesurée à la sortie du générateur

Figure.4.7. Ecart entre la consigne et la tension mesurée

Figure.4.8. Somme des trois tensions de sortie

Introduction générale

Les tensions d'alimentation des différents types d'appareillages domestiques ou industriels doivent être maintenues constantes avec néanmoins une marge de sécurité jugée acceptable pour garantir un bon fonctionnement.

Ces tensions sont fournies par tout un réseau électrique dont la source de tension est l'alternateur. Pour un système autonome, l'objectif est d'avoir aux bornes du générateur une tension constante indépendante de la variation de la charge ou varie dans une plage acceptable, aussi petite que possible. La réalisation d'un tel système nécessite une action sur l'excitation de la machine. Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les différents modes de production d'énergie électrique employé dans le monde et particulièrement « la centrale thermique à cycle combiné de Hadjret Ennous » ou notre stage pratique a eu lieu, chez la société GENERAL ELECTRIC .

Le deuxième chapitre établie la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné en mode générateur, pour analyser le comportement de la machine lors de la variation de la charge. Cependant, l'alternateur est l'élément clé dans tout système de production.

La troisième chapitre consiste à étudier les différents types de systèmes d'excitation des alternateurs de production d'une manière générale, avant de passer à l'étude du système d'excitation associé à l'alternateur 450H de la société GENERAL ELECTRIC dans le but est d'établir un modèle simplifié.

Le quatrième chapitre présente la méthode stochastique développée (PSO) pour optimiser les paramètres du régulateur de tension, et les résultats de simulation qui montrent l'efficacité de la régulation.

Enfin, nous terminons le mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

1.1 Introduction

La production d'électricité est essentiellement un secteur industriel, destiné à mettre à disposition de l'ensemble des consommateurs la possibilité d'un approvisionnement adapté à leurs besoins en énergie électrique.

L'électricité est communément présentée comme une "énergie propre". Toutefois l'électricité n'est pas une énergie disponible naturellement sur terre, elle est donc produite par conversion de d'autres formes d'énergie en énergie électrique.

La production d'électricité se fait depuis la fin du 19^{ème} siècle à partir de différentes sources d'énergies primaires dont chacune des sources présente des impacts environnementaux, économiques et sociaux que l'on cherche toujours à limiter. Vue la demande incessante, la production de l'énergie électrique connaît une évolution importante durant la dernière décennie.

Plusieurs technologies de production d'électricité existent dont on peut citer :

- les énergies renouvelables
- les centrales thermiques
- Les barrages hydrauliques

Dans chacune des technologies de production d'électricité, les alternateurs constituent l'élément en commun jouant un rôle primordial dans la chaîne de production.

1.2 Technologies de production de l'énergie électriques

La production de l'énergie électrique ne cesse d'évoluer, aujourd'hui plusieurs moyens sont utilisés pour générer les besoins énergétiques. Le choix des technologies à employer pour la

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

génération repose sur les critères économiques, sociales et géographiques. Dans ce qui va suivre, nous développerons les différentes technologies de production d'énergie électrique.

1.2.1 Centrale hydraulique

La centrale hydraulique utilise la force de l'eau créée par un puissant déplacement. Il peut s'agir d'une chute d'eau naturelle, de l'eau stockée dans un barrage, des mouvements de la marée ou des courants marins.

Une centrale hydraulique utilise l'énergie fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique. Un barrage retient une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Pour produire de l'électricité, les vannes du barrage sont ouvertes, de l'eau s'y engouffre dans une conduite forcée dans le barrage, sa vitesse augmente. A la sortie de cette conduite, l'eau fait tourner une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend le cours normal de la rivière.

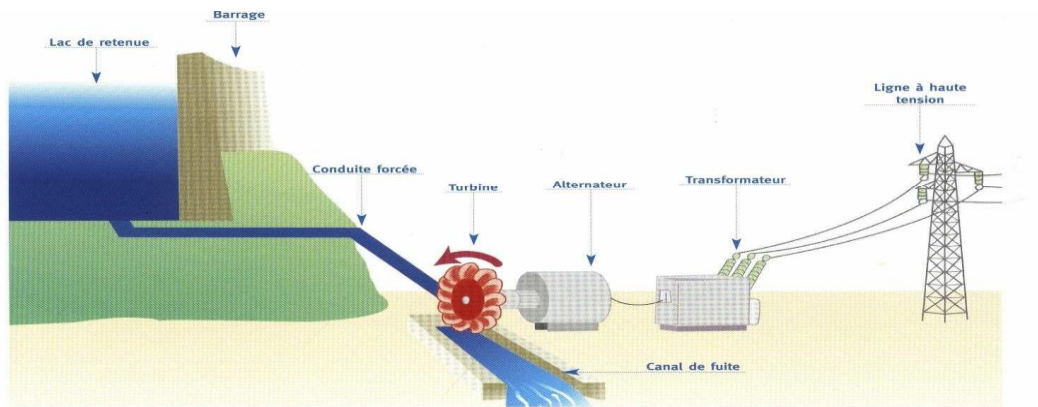


Figure 1.1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique

L'hydroélectricité est considérée comme une énergie propre et inépuisable. Les centrales hydrauliques sont très répandues dans le monde connaissant des progrès techniques énormes comme le barrage des trois gorges en Chine.

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

1.2.2 Centrale thermique nucléaire

La centrale thermique nucléaire utilise le procédé de fission des atomes d'uranium. Cela produit de la chaleur qui se transforme ensuite en vapeur et fait tourner la turbine. Dans un réacteur nucléaire comme dans toute centrale thermique, on transforme l'énergie libérée par un combustible sous forme de chaleur en énergie mécanique, puis électrique. Dans une centrale thermique classique, la chaleur provient de la combustion du charbon ou du fioul ; cependant dans une centrale nucléaire, elle provient de la fission de l'uranium.

Il y a fission quand un neutron libre entre en collision avec un noyau d'uranium fissile et en provoque l'éclatement. Cette rupture libère plusieurs neutrons en dégageant une certaine quantité d'énergie.

Avant les années 1980-1990, le nucléaire était très compétitif par rapport aux autres moyens de production mais du fait des coûts économiques croissants, dus aux durées de construction de plus en plus longues, et le faible coût des combustibles fossiles le nucléaire a été moins compétitif. Dans certains pays une peur des déchets radioactifs et d'accidents nucléaires a conduit à renoncer à l'énergie nucléaire. [1]

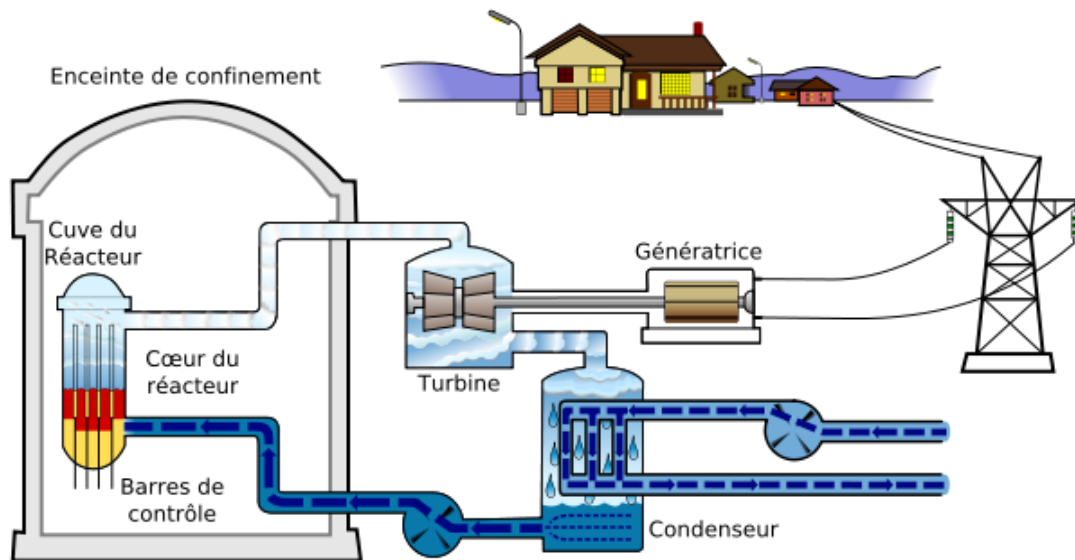


Figure 1.2. Schéma de principe d'une centrale nucléaire

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

1.2.3 Centrale thermique à flamme

La centrale thermique à flamme utilise la force de la vapeur dégagée en brûlant des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) ou de la biomasse (déchets végétaux ou ménagers). Une centrale thermique produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Cette source peut être un combustible brûlé (gaz naturel, certaines huiles, charbon, déchets industriels, déchets ménagers, etc.), la fission de noyaux d'uranium 235 ou de plutonium 239, ou encore de la chaleur préexistante (noyau de la Terre pour la géothermie, soleil etc.).

La source chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique.

Pour entraîner la turbine, il faut que la pression soit plus faible à la sortie de celle-ci, qu'à l'entrée. Ceci est obtenu en condensant la vapeur, en aval de la turbine, à l'aide d'une source froide. Il faut toujours une source chaude et source froide, pour échanger un travail avec une machine thermique. Le fluide condensé est en général réutilisé comme source de vapeur et effectue alors un cycle thermodynamique.

Pour ce mode de production, l'énergie est relativement indépendante des conditions météorologiques, la source d'énergie peut être (dans une certaine mesure) facilement stockée et la densité de puissance est très élevée.

Pour les centrales thermiques en générale, on distingue deux configurations possibles du cycle de production :

a Cycle Simple

Les centrales à cycle simple existent sous deux formes :

- centrale thermique à vapeur : l'énergie calorifique du gaz est utilisée pour produire de la vapeur, qui actionne une turbine à vapeur reliée à un alternateur. Plus les combustibles, une telle installation doit disposer d'une source d'alimentation en eau, d'une part, pour compenser les pertes d'eau inévitables dans le circuit et d'autre part, pour refroidir et condenser la vapeur d'échappement de la turbine afin qu'elle puisse servir de nouveau dans le cycle de génération de vapeur. Le rendement de ce type de centrale varie entre 38 et 42% mais avec un lent démarrage.

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

- centrale thermique à gaz : le fluide moteur n'est d'autre que les gaz chauds produits par la combustion du gaz naturel avec l'air comprimé provenant du compresseur. À l'échappement de la turbine à gaz, la température des fumées dépasse les 500°C. Une grande partie de la chaleur environ 67% est ainsi perdue dans l'atmosphère. Le rendement de la turbine à gaz la plus performante fabriquée à ce jour est de 40%.

b Cycle Combiné

L'idée du cycle combiné est de récupérer l'énergie perdue sous forme de chaleur lors de l'utilisation de la turbine à gaz en cycle simple, afin d'augmenter le rendement. Le cycle consiste à brûler du gaz dans une turbine à gaz, et profiter des gaz d'échappement de la turbine à gaz pour produire de la vapeur dans une chaudière de récupération de chaleur pour finalement la développer dans une turbine à vapeur qui entraîne un alternateur ou deux alternateurs (selon la configuration). Les centrales thermiques à cycle combinée, malgré la complexité technique et le coût élevé en investissement, sont plus économiques vue le rendement élevé pouvant atteindre 58 %. Ce rendement très élevé de production d'électricité s'accompagne d'une réduction significative des émissions de polluants atmosphériques.

Le cycle combiné peut être réalisé sous deux configurations possibles en arbre unique ou en multi arbres. Pour la première configuration est constitué d'une seule turbine à gaz, d'une seule chaudière de récupération qui alimente une turbine à vapeur et d'un unique alternateur dimensionné pour les deux turbines. Les arbres des deux turbines sont attelés à l'arbre de l'alternateur. Un cycle combiné multi-shaft est constitué d'une ou plusieurs turbines à gaz, d'une chaudière de récupération pour chaque turbine à gaz ou d'une chaudière commune à toutes les turbines à gaz, d'une turbine à vapeur et d'un alternateur pour chaque turbine.

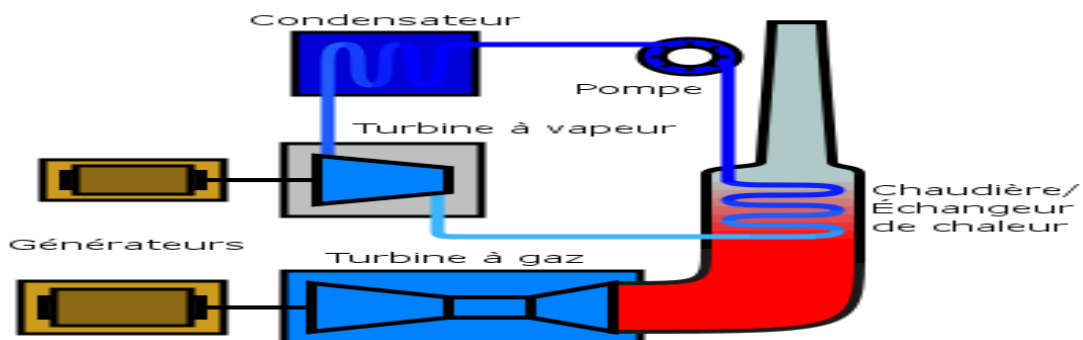


Figure 1.3. Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné multi arbres

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

1.2.4 Technologies nouvelles

a Biomasse

La biomasse est une énergie constituée de matières organiques végétales ou animales (déchets ménagers ou agricoles). Sa combustion permet de produire de l'électricité.

En écologie, la biomasse est la quantité totale de matière (masse) de toutes les espèces vivantes présentes dans un milieu naturel donné. Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. Pour obtenir de l'énergie à partir de la biomasse, différents procédés et certaines conditions doivent être réalisés, comme l'utilisation de biogaz, méthane issu de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration, etc. La méthode la plus courante est de le brûler dans un moteur à gaz ou une petite turbine, pour produire de l'électricité injectée sur le réseau, et souvent de la chaleur en cogénération.

b Energie solaire

C'est un moyen pratique pour alimenter des lieux isolés non raccordés au réseau électrique. Un panneau solaire ou capteur solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie du rayonnement solaire pour le convertir en énergie électrique. On distingue essentiellement deux types de panneaux solaires :

- les panneaux solaires thermiques appelés capteurs solaires convertissent la lumière en chaleur.
- les panneaux solaires photovoltaïques appelés modules photovoltaïques convertissent la lumière en électricité.

Les principaux avantages de l'énergie solaire sont :

- la facilité de construction
- faible coût de maintenance

Leur rendement dépend essentiellement du climat.

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

c Les éoliennes

Les éoliennes utilisent la force du vent qui actionne leurs hélices. Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui peut être relié à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines, mais il existe aussi des machines seules. Cette technologie après 1957 a été quelque peu délaissée et il faudra attendre les années 1970 pour que le Danemark reprenne les développements d'éoliennes bien que se soit une énergie inépuisable et productrice d'électricité.

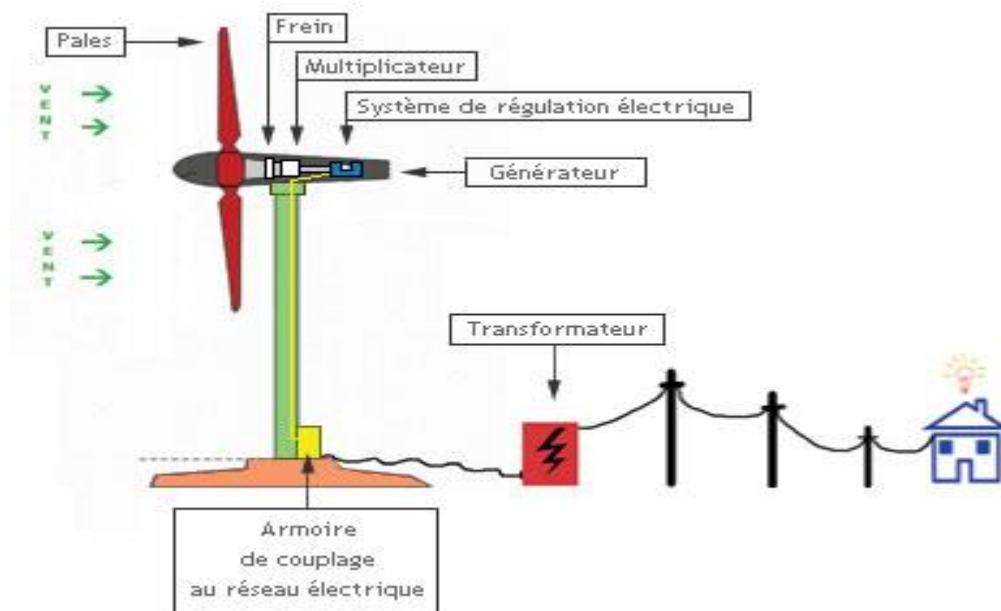


Figure 1.4. Schéma de fonctionnement d'une éolienne

1.3 La centrale thermique à cycle combiné Hadjret Ennas

La centrale thermique à cycle combiné de Hadjret Ennas se situe à 120 Km de la capitale Alger dans la wilaya de Tipaza en bordure de la mer méditerranée, elle a été réalisée par la société « SKH SPA » en Décembre 2006 et elle est rentrée en exploitation officielle en juin 2009.

Cette Centrale a une puissance de 1227 MW et une capacité annuelle de production d'environ 9 900 GWh. Elle comporte trois tranches d'une puissance 400MW chacune, les

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

turbines, l'alternateur et les équipements auxiliaires sont conçus par la société « GENERAL ELECTRIC » qui assure le fonctionnement et la maintenance régulière de ces derniers [2].

La tension de sortie de chacun des trois alternateurs est de 18 000 V, qui passe ensuite par un transformateur élévateur qui la ramène à 400 000 V, le carburant principal est le gaz naturel alors que le carburant de secours est le gasoil. Le refroidissement est assuré par l'eau de mer.

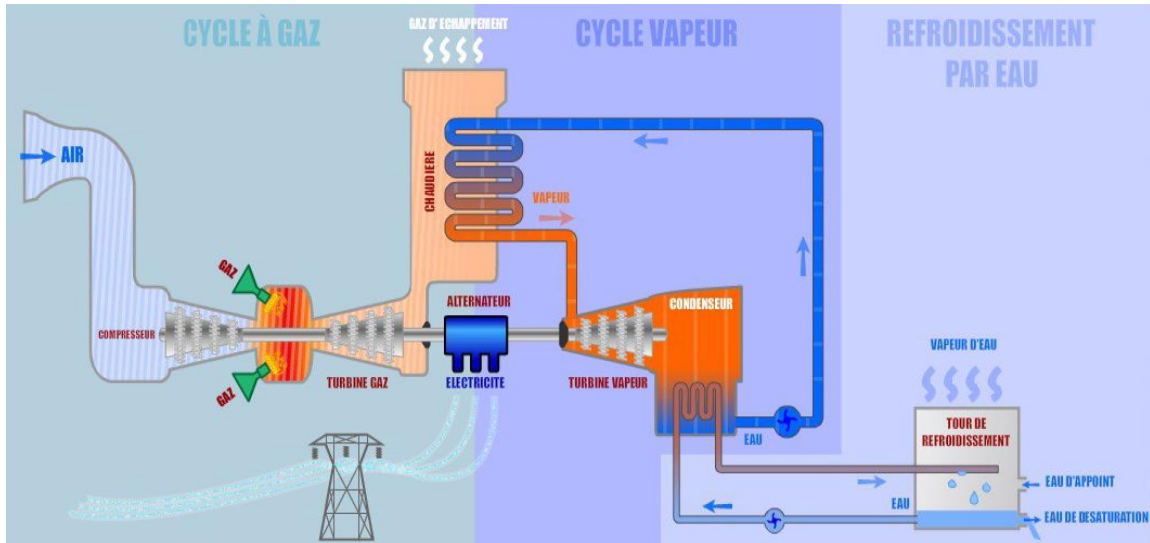


Figure 1.5. Taux de production par producteur en Algérie 2011

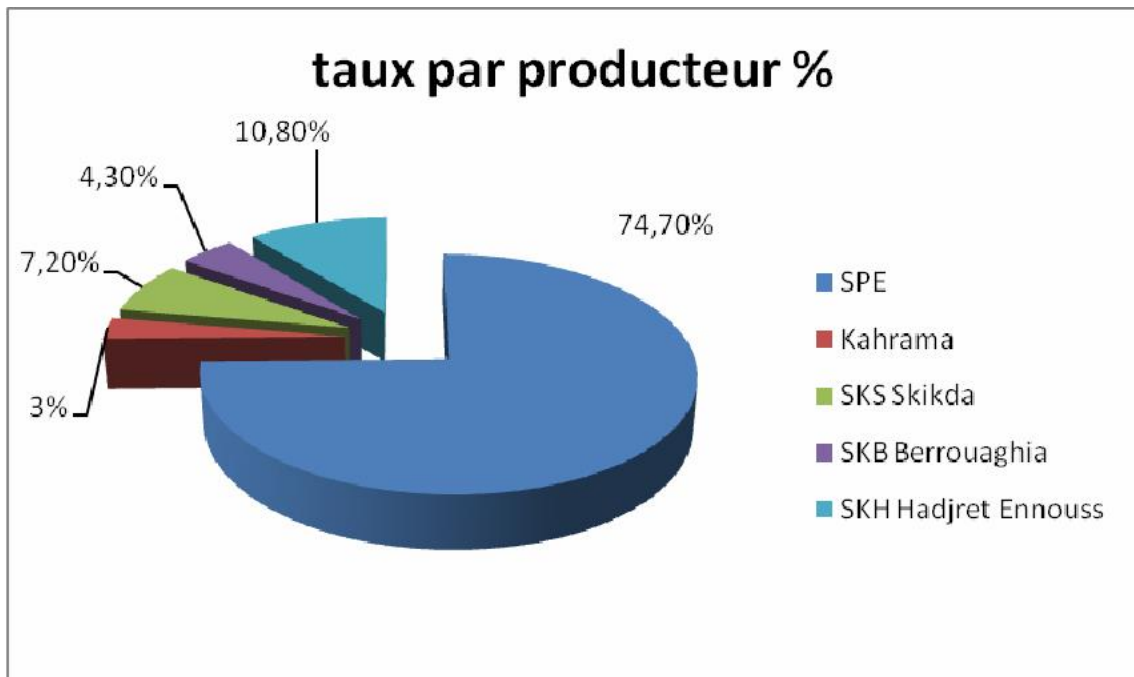


Figure 1.6. Schéma du fonctionnement de la centrale à cycle combiné Hadjret Ennours

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

La centrale est composée des éléments suivants :

- Alternateur 450H
- La turbine à gaz 9FB
- La turbine à vapeur A15
- La chaudière de réparation
- Le condenseur

1.3.1 Alternateur

L'alternateur de General Electric 450H est une machine synchrone AC triphasé, d'une puissance apparente de 544 MVA et une tension aux bornes de 19 KV. L'excitation de l'alternateur est de type statique. La machine est conçue pour être exploitée de manière continue, en fournissant de l'énergie depuis les bornes alternateur (induit), le refroidissement de cet induit est assuré par le maintien de la pression et de la pureté de l'hydrogène et d'apport d'eau de réfrigération et d'huile de lubrification. [3]

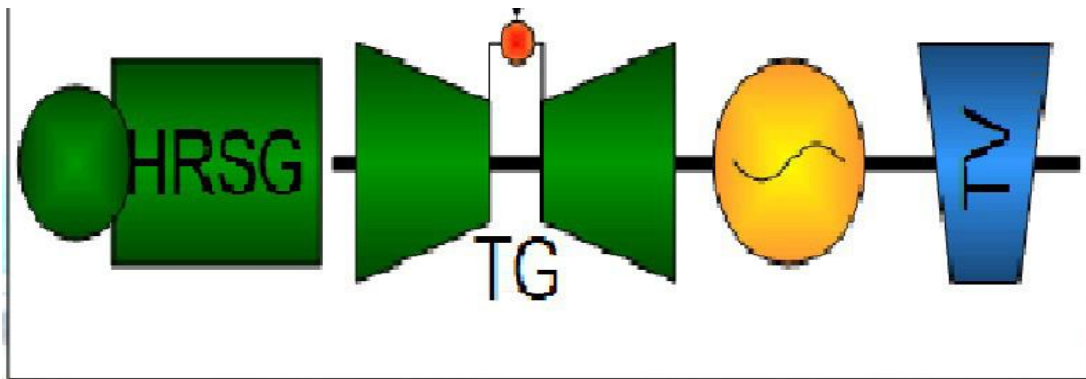


Figure 1.7. Un schéma qui montre l'emplacement de l'alternateur sur l'arbre du cycle combiné

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

L'alternateur est monté en série entre une turbine à gaz lié à la chaudière de récupération qui est responsable sur la génération de la vapeur et la turbine à vapeur, les deux turbines agissent sur l'alternateur à une vitesse constante.

| HYDROGEN-COOLED GENERATOR NO. 290T661 | | RATING |
|--|-------------------|---|
| 2 POLES 3 PHASE WYE CONN. 50 HERTZ | | 3000 RPM GAS 98% PURITY AT 75 PSIG |
| TOTAL TEMPERATURE AT RATING | KVA: | 544000 |
| GUARANTEED NOT TO EXCEED: | ARMATURE AMPS: | 16530 |
| 103 °C ON ARMATURE BY DETECTOR | ARMATURE VOLTS: | 19000 |
| 120 °C ON FIELD BY RESISTANCE | FIELD AMPS: | 3076 |
| MAXIMUM COLD GAS TEMPERATURE: 44 °C | EXCITATION VOLTS: | 585 |
| INLET LIQUID: 28.6 °C | POWER FACTOR: | 0.8 |
| CAUTION BEFORE INSTALLING, OPERATING, OR DISMANTLING, READ INST. GEK- 111139 | | |
| GE Power Systems General Electric Company | | Schenectady, New York Made in U.S.A. |

Figure 1.8. Plaque signalétique de l'alternateur 450H

L'alternateur 450H est un modèle récent très complexe. il comporte les structures suivantes :

- stator
- rotor
- système d'excitation

a Structure du stator

C'est une carcasse cylindrique étanche au gaz, construit par des tôles soudées et rigidifiées à l'intérieur dans la direction radiale par des méplats et dans la direction axiale par des barres et transverses.

L'armature du stator est suspendue à la structure par des barres soudées aux plaques de la structure. Les disques du noyau du stator (punchings) sont maintenus sous pression axialement par des ailes vissées aux extrémités des barres. La figure suivante montre la Structure du stator ou on voit les tubes de réfrigération, les barres clavettes et les plaques.

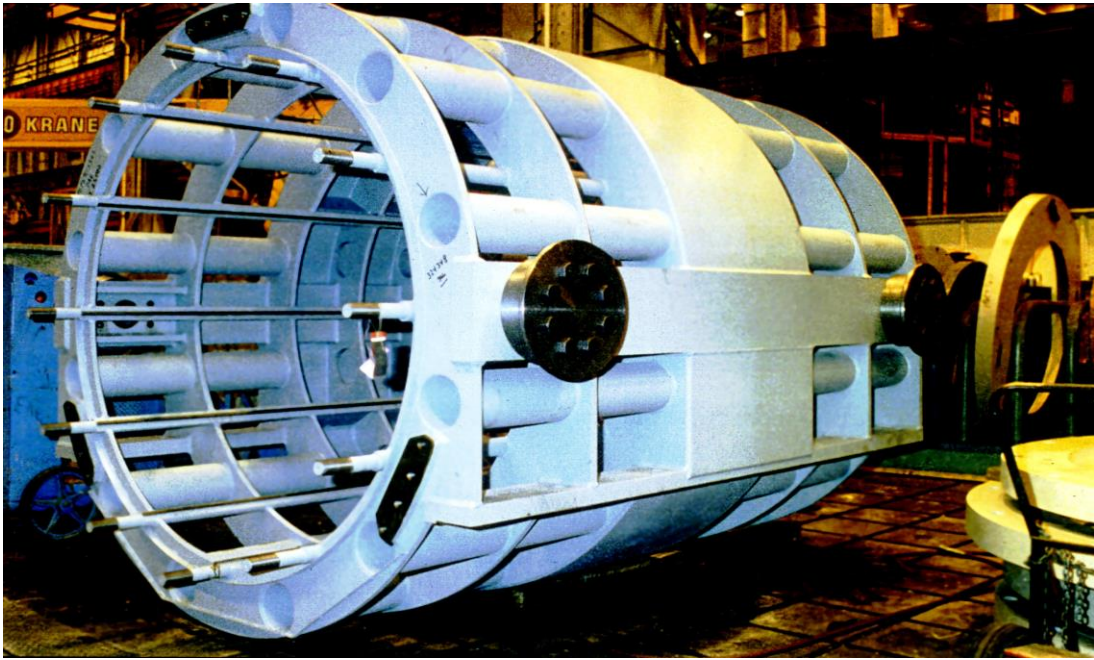


Figure 1.9. Structure du stator

b Noyau du stator

Le Noyau du stator est réalisé à partir de disques isolés, segmentés, recuits de direction préférentielle, orientés selon le grain, en acier à silice de haute qualité pour minimiser les pertes électriques. Ces disques s'assemblent et sont séparés en paquets à travers des blocs écarteurs pour avoir des passages de ventilation.

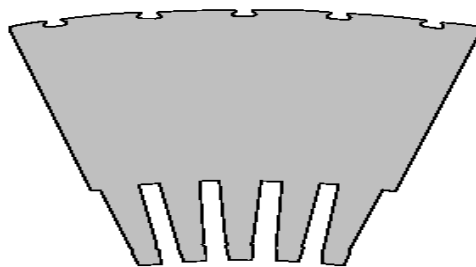


Figure 1.10. Tôles laminés

c Enroulements statoriques

Les enroulements statoriques sont faits de barres isolées assemblées dans les rainures du stator. Les barres sont faites de fils conducteurs de cuivre isolés transposés selon la méthode

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

“Roebel” de manière à ce que chaque fil occupe une longueur égale sur toute la largeur de la barre à chaque endroit radial de la rainure.

Cette disposition évite la perte de courant circulant qui serait présent sous certaines conditions de charge du à la distribution auto-inductive des flux magnétiques dans la rainure de la bobine. Quand les enroulements sont énergisés, ils agissent comme un électroaimant tournant à l'intérieur de l'alternateur et induisant une tension dans les enroulements statoriques stationnaires et dans l'ensemble du noyau.

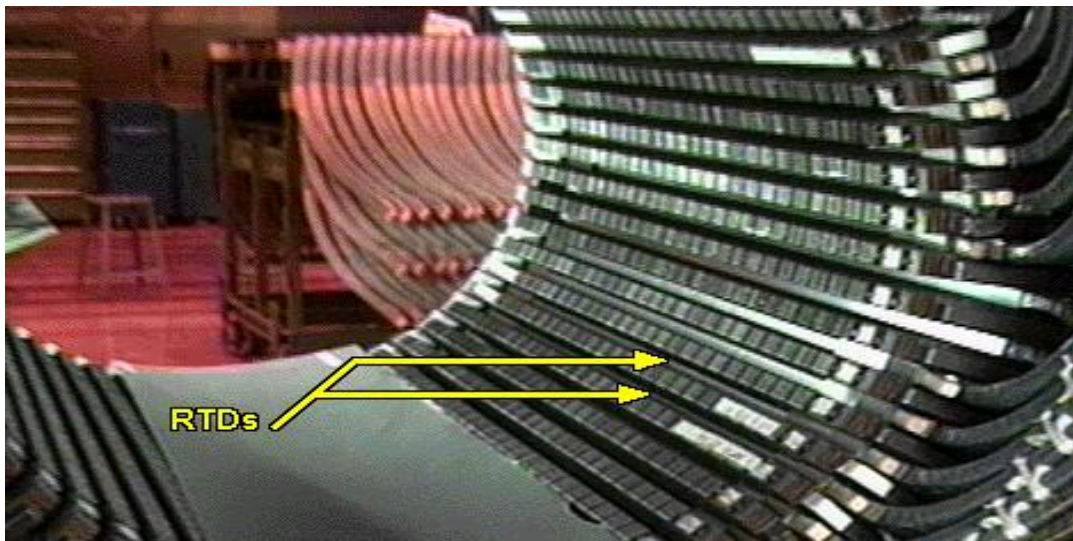


Figure 1.11. Les barres statoriques

d Rotor

Le rotor se compose d'un axe tournant et de groupes d'enroulement de cuivre fixés à cet axe formant les enroulements de champ de l'alternateur.

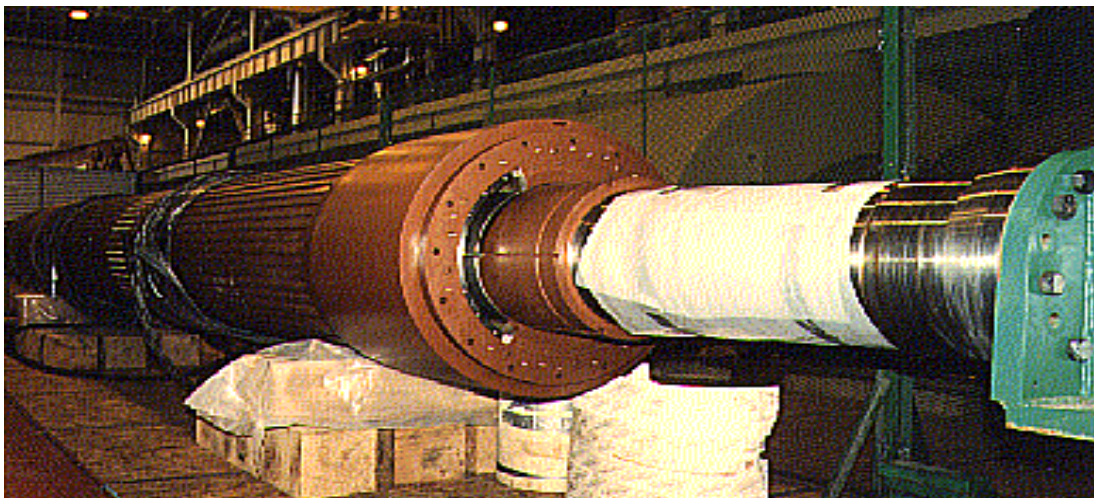


Figure 1.12. Rotor d'un turboalternateur

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

Le rotor est usiné à partir de d'acier forgé allié simple qui a passé des tests étendus pour s'assurer que la forge répond aux propriétés métallurgiques et physiques requises. Les rainures longitudinales, radialement usinées dans le corps contiennent les bobines de champ. Des rainures additionnelles usinées dans les dents permettent la ventilation du corps du rotor.

e Système d'excitation

Le courant aux enroulements est fourni à travers les anneaux collecteurs connectés électriquement par les barres de cuivre isolé assemblés dans le centre percé de la forge du rotor. Les anneaux collecteurs sont des forges d'acier traités thermiquement encastrés à l'extrémité de l'axe tournant (et isolés de ce même axe). Ils offrent une surface de contact pour les balais.

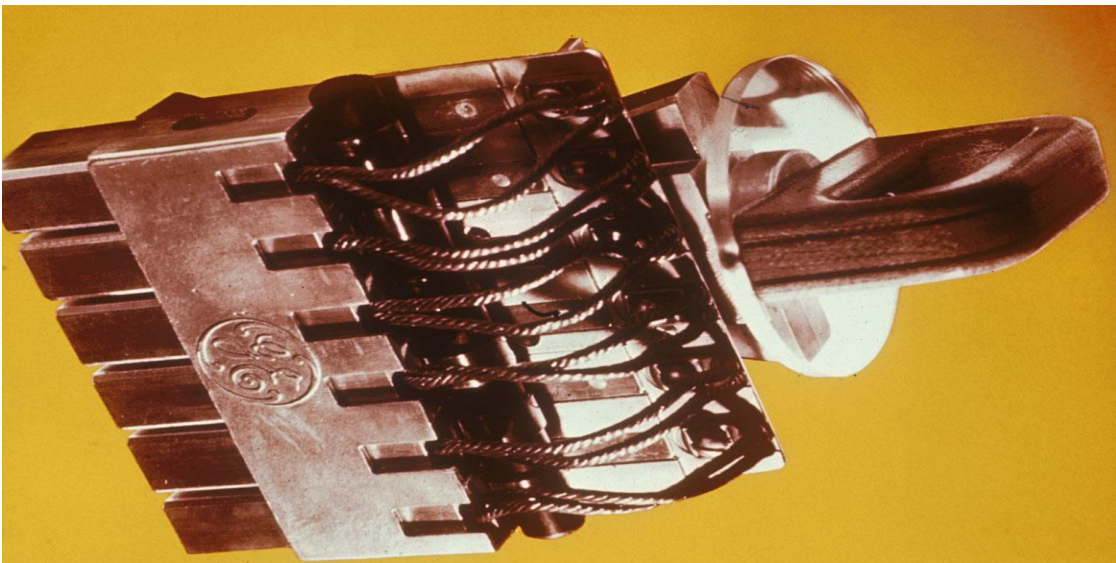


Figure 1.13. Borne de connexion du courant d'excitation (charbon)

Le courant d'excitation depuis ces anneaux collecteurs d'acier se déplace à travers divers terminaux pour connecter les barres dans le trou central de l'axe. Les barres de connexion sont isolées les unes des autres.

Elles s'emboîtent dans un tube d'isolation dans le trou le long de la ligne d'axe depuis le collecteur à un point en dessous des boucles extrêmes de l'enroulement de champ.

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

D'autres baguettes terminales sont connectées depuis les barres de connexion aux enroulements de champ. Les baguettes terminales des enroulements et du collecteur sont pourvues de joints pour éviter les fuites d'hydrogène.

Les anneaux collecteurs se placent dans le logement prévu dans le collecteur qui est ventilé par le ventilateur du collecteur. Les balais se fabriquent à partir de différentes compositions de graphite naturel et matériaux adhérents, ils ont un coefficient de frottement bas et ils sont auto lubrifiés. Un ressort à pression constante est monté radialement (faisant partie du porte-balai) au-dessus de chaque balai de manière à ce que soit appliquée la pression à la ligne neutre du balai.

1.3.2 Turbine à gaz 9FB

La turbine à gaz 9FB est l'une des dernière série de turbine à gaz dans le monde, elle est conçu pour le fonctionnement en cycle simple ou cycle combiné, sa mise en marche est assurée par la combustion d'un fioul avec l'air comprimé. La turbine comporte :

- Le compresseur
- Le système de combustion
- La turbine
- L'échappement

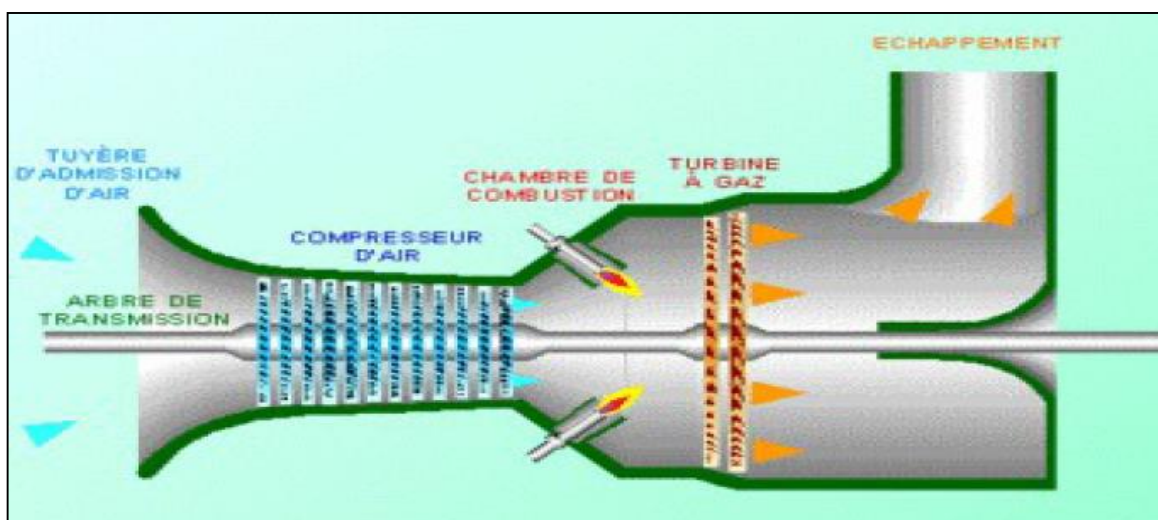


Figure 1.14. Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz [2]

Chapitre 1 Production d'énergie électrique

1.3.3 La Turbine à vapeur A15

La turbine à vapeur de General Electric modèle A15 est composée de 3 corps, un corps de haute pression et un corps de moyenne pression de flux opposés pour équilibrer les impulsions axiales et un autre corps de basse pression à double flux. Donc, il existe trois niveaux de pression : haute pression HP, moyenne pression MP et basse pression BP. La division de la turbine en étages permet de resurchauffer la vapeur entre les étages, ce qui donne un meilleur rendement au cycle thermique.

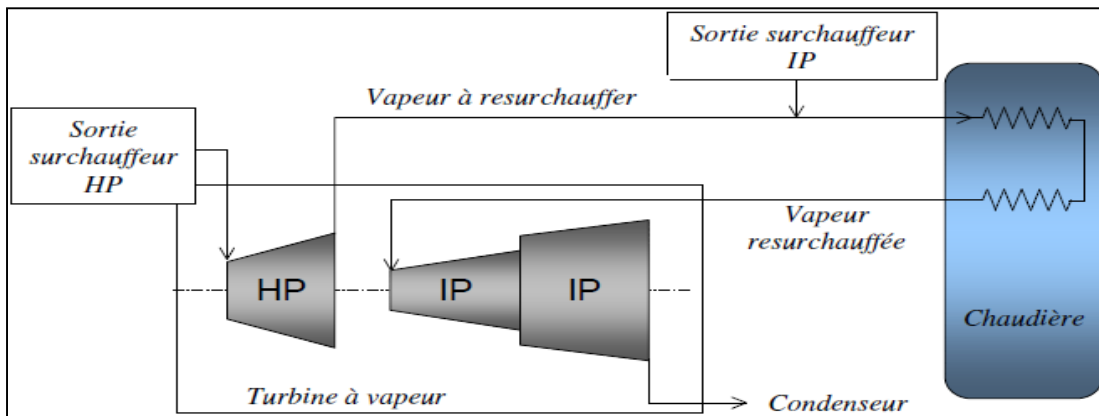


Figure 1.15. Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur

1.3.4 La Chaudière de récupération HRSG

Le rôle de la chaudière de récupération HRSG est de générer de la vapeur en utilisant la chaleur issue de la combustion des gaz. Cette vapeur alimente la turbine à vapeur.

1.3.5 Le condenseur

Le condenseur est utilisé pour accomplir les tâches suivantes :

- condenser la vapeur déchargée par la turbine de vapeur
- fournir une chambre de stockage pour l'eau condensée (puits chaud ou puits du condenseur)
- Le dégazage de l'eau (soustraction des gaz dissous)
- réchauffer la vapeur condensée émanant des tubes et les fluides issus des purges et des différents drainages jusqu'à la température de saturation

1.4 Conclusion

La production de l'énergie évolue avec les progrès techniques réalisés pour générer au mieux les besoins croissants en énergie électrique.

Dans ce chapitre, les différentes technologies de production de l'énergie électrique ont été présentées. Cependant, l'alternateur est l'élément clé dans la production électrique. L'alternateur est généralement une machine synchrone fonctionnant en mode générateur.

Le chapitre suivant présente la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné en mode moteur et générateur.

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

2.1 Introduction

La machine synchrone est l'une des machines les plus employées dans l'industrie généralement et dans la production de l'énergie électrique particulièrement.

La modélisation de la machine synchrone peut être réalisée par deux approches :

- La méthode des éléments finis permet de résoudre numériquement les équations générales de l'électromagnétisme par maillage de la machine.
- La méthode analytique consiste en l'étude des caractéristiques dynamiques de la machine synchrone.

Dans ce travail, la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné par l'approche analytique est développée.

2.2 La machine synchrone

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants permanents, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est fixée par rapport au rotor, imposant en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [5].

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

Dans la machine synchrone, le rotor est muni d'amortisseurs. Ces derniers sont des barres de cuivre reliées ensemble aux deux extrémités du rotor (en court-circuit). Le rôle principal des amortisseurs est d'amortir la vitesse de rotation lors des perturbations. Ils permettent aussi le démarrage de la machine en asynchrone (démarrage en asynchrone synchronisé).

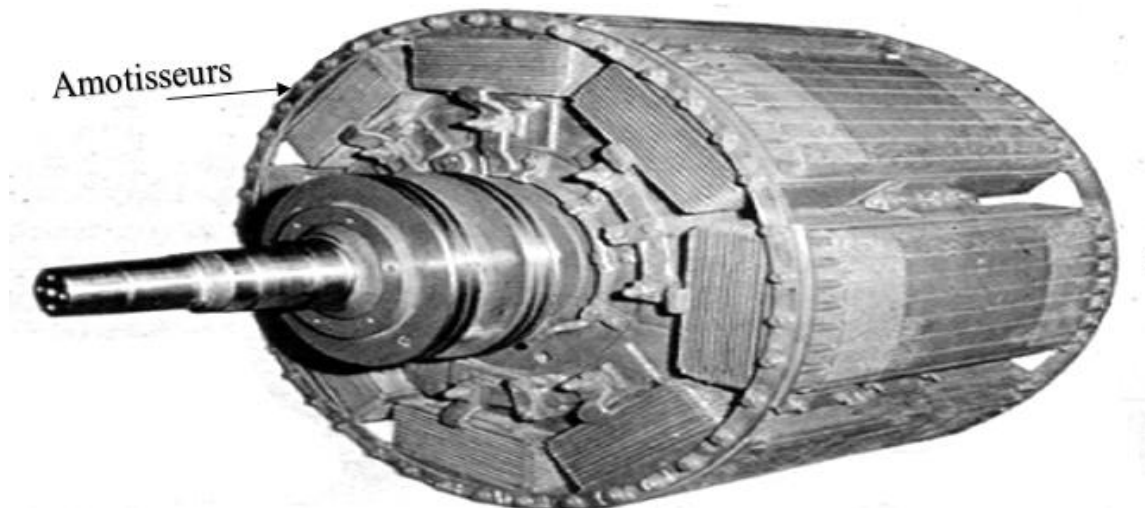


Figure 2.1. Rotor munis des amortisseurs

2.2.1 Classification des machines synchrones

La topologie du rotor des machines synchrones diffère selon le mode de fonctionnement et l'utilisation de la machine. On distingue trois types de rotor :

- rotor à pôles saillants
- rotor à pôles lisses
- rotor à aimant permanent

a Rotor à pôles saillants

Le rotor comporte des pôles autour desquelles est bobiné un enroulement inducteur. Le sens de réalisation du bobinage est alterné à chaque pôle. L'enroulement est traversé par un courant continu et donne naissance à une f.m.m le long de l'entrefer. Les pôles sont munis d'épanouissements polaires dont la forme est étudiée de manière à obtenir une répartition quasi sinusoïdale de la f.m.m créée par l'inducteur. Les pôles comportent aussi des amortisseurs formés de barres logées dans les épanouissements polaires, au plus près de l'entrefer.

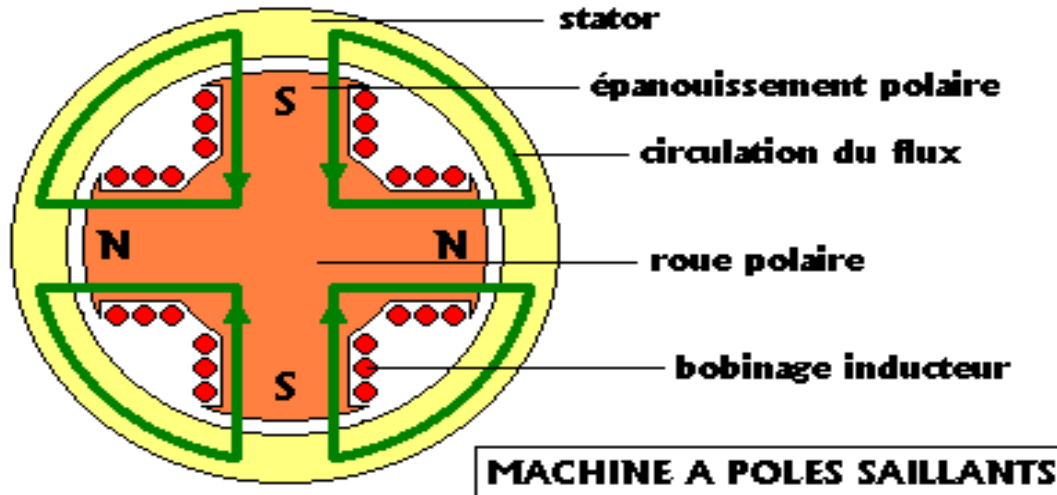


Figure 2.2. Rotor bobiné à pôles saillants

b Rotor à pôles lisses

Le rotor est cylindrique. L'arbre peut être constitué d'une seule pièce massive comportant des encoches, ou d'un circuit magnétique feuilleté. L'enroulement inducteur traversé par un courant continu est logé dans des encoches. La partie massive si elle existe, constitue l'amortisseur dont la fonction est similaire à celui de la machine à pôles saillants.

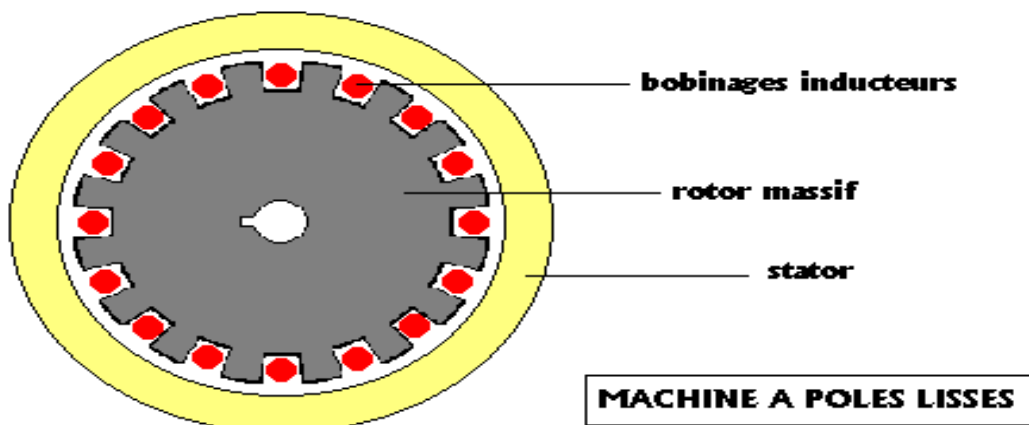


Figure 2.3. Rotor bobiné à pôles lisses

c Machine synchrone à aimant permanent

La mise au point des aimants permanent de grande qualité favorise l'utilisation de ce type de machine permettant d'obtenir des couples massiques élevés. Ce type de machine est employé pour des applications de puissance inférieure à quelques dizaines de KW, ou l'aimant permanent permet d'obtenir à taille égale, une induction dans l'entrefer plus importante que la machine à rotor bobiné. L'emploi d'un aimant permanent annule les pertes par effet joules au rotor augmentant le rendement de la machine. Dans une MSAP, les pôles sont représentés par une flèche indiquant le sens d'aimantation.

2.2.2 Le principe de fonctionnement

La machine synchrone est une machine réversible pouvant fonctionner en moteur ou en générateur (alternateur). En fonctionnement générateur, le rotor est entraîné à la vitesse ω et les enroulements du stator sont balayés par le champ créé par l'inducteur au rotor. Les enroulements sont alors le siège de f.e.m triphasées de pulsation $\omega = p\Omega$.

En fonctionnement moteur, les enroulements statoriques sont alimentés par un système de tensions triphasées de pulsation $\omega_e = p\Omega$. Ils créent un champ tournant. Ce dernier fixe par rapport au rotor tourne en synchronisme avec le champ créé par l'induit. Ces deux champs interagissent. Le couple ainsi créé entraîne la machine à la vitesse Ω [7].

2.3 La mise en équations

La modélisation de la machine synchrone en mode moteur/générateur requière les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Seule la première harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice (f.m.m) créée par chaque phase de l'induit est prise en compte. Ceci implique que les enroulements des phases statoriques peuvent être considérés à distribution sinusoïdale.
- La perméabilité de la machine est constante. Ceci suppose que le circuit est parfaitement linéaire. La saturation magnétique est négligée. Cette hypothèse permet de considérer que les flux sont des fonctions linéaires simples des courants.
- Les circuits magnétiques sont laminés, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteurs, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants.

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

- L'ensemble des amortisseurs peut être représenté par des enroulements fermés en court-circuit sur eux-mêmes. Des amortisseurs sont représentés sur l'axe direct, et d'autres sur l'axe en quadrature. Le nombre des amortisseurs est déterminé par le type du rotor et par la bande de fréquence d'opération.

2.4 Modèle de la machine synchrone dans le repère abc

Plusieurs conventions et notations sont prises en considération dans la littérature [5, 6, 7], dans la modélisation de la machine synchrone. Dans ce travail, nous avons choisi la norme IEEE standard (1110-1991) "IEEE guide to synchronous machine modeling".

Le stator est représenté par trois enroulements identiques et décalés de 120° l'un par rapport à l'autre.

Dans le mode générateur, les courants sortants des enroulements statoriques sont considérés positifs ainsi que les courants dans les enroulements rotoriques.

Dans l'analyse du comportement, les enroulements amortisseurs sont représentés par des enroulements en court-circuit D et Q placés suivant l'axe polaire 'd' et l'axe interpolaire 'q'. L'enroulement inducteur 'f' est représenté suivant l'axe d [8]. La figure 2.4 illustre la machine synchrone dans le repère abc.

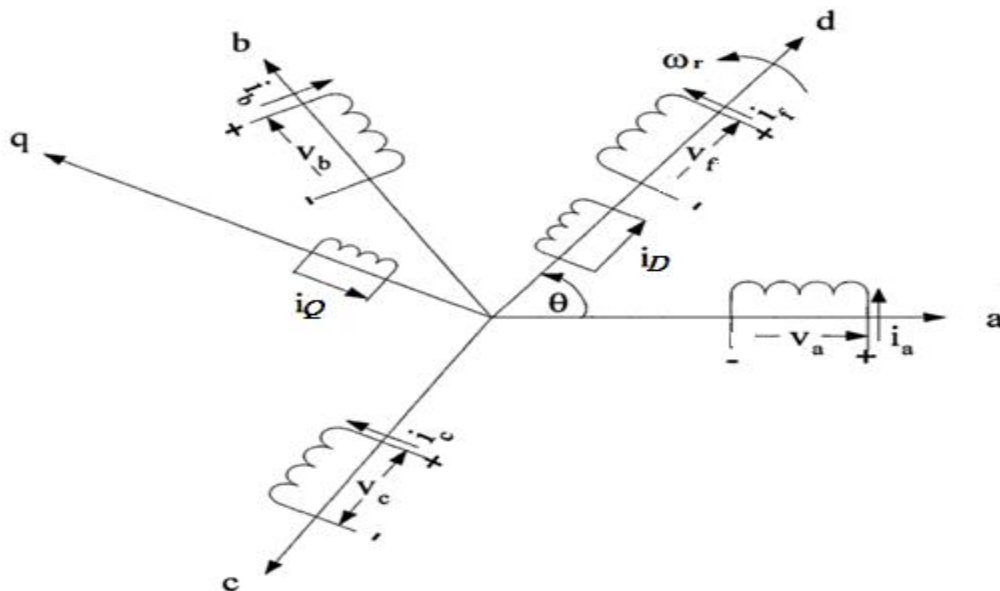


Figure 2.4. Représentation schématique de la machine synchrone à rotor bobiné

La complexité de la représentation de la machine dépend du nombre d'amortisseurs sur chaque axe. Chacun des axes peut comporter jusqu'à trois enroulements. Dans ce travail, chacun des axes comporte un seul enroulement amortisseur.

2.4.1 Equations des tensions

a Tensions statoriques

En appliquant la loi de Kirchhoff, on obtient les équations suivantes [5]:

En fonctionnement moteur :

$$V_a = R_s i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$V_b = R_s i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (2.2)$$

$$V_c = R_s i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2.3)$$

En fonctionnement générateur :

$$-V_a = R_s i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (2.4)$$

$$-V_b = R_s i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (2.5)$$

$$-V_c = R_s i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2.6)$$

où

R_s : Résistance statorique supposée la même pour les trois phases

ϕ_i : Flux des trois phases statoriques (i=a,b,c)

b Tensions rotoriques

Les équations de tensions rotoriques sont identiques pour les deux modes de fonctionnement de la machine synchrone (moteur/générateur). L'application de la loi de Kirchhoff sur les enroulements suivants les deux axes 'd' et 'q' donne les équations suivantes:

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (2.7)$$

$$V_D = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \quad (2.8)$$

$$V_Q = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \quad (2.9)$$

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

où

R_f, R_D, R_Q : Résistances des enroulements rotoriques f, D et Q respectivement

ϕ_f, ϕ_D, ϕ_Q : Flux des enroulements rotoriques f, D et Q respectivement

2.4.2 Expressions des flux

Les équations des flux sont identiques pour les deux modes de fonctionnement (moteur/générateur). Les expressions des flux statoriques sont données par l'équation suivante :

$$\phi_{abc} = [L_s]i_{abc} + [L_{sr}]i_{rotor} \quad (2.10)$$

où

$$i_{abc} = [i_a i_b i_c]^t$$

$$i_{rotor} = [i_f i_D i_Q]^t$$

$[L_s]$: Matrice des inductances propres des trois phases

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

L_i : Inductance propre de l'enroulement statorique ($i=a,b,c$)

L_{ij} : Inductance mutuelle entre les trois enroulements statoriques ($i \neq j$)

$[L_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et les enroulements rotoriques.

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{aD}(\theta) & M_{aQ}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bD}(\theta) & M_{bQ}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{cD}(\theta) & M_{cQ}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\phi_a = L_a(\theta)i_a + M_{ab}(\theta)i_b + M_{ac}(\theta)i_c + M_{af}(\theta)i_f + M_{aD}(\theta)i_D + M_{aQ}(\theta)i_Q \quad (2.13)$$

$$\phi_b = M_{ba}(\theta)i_a + L_b(\theta)i_b + M_{cb}(\theta)i_c + M_{bf}(\theta)i_f + M_{bD}(\theta)i_D + M_{bQ}(\theta)i_Q \quad (2.14)$$

$$\phi_c = M_{ca}(\theta)i_a + M_{cb}(\theta)i_b + L_c(\theta)i_c + M_{cf}(\theta)i_f + M_{cD}(\theta)i_D + M_{cQ}(\theta)i_Q \quad (2.15)$$

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

Les flux rotoriques s'exprime en fonction des courants par l'expression suivante:

$$\phi_{rotor} = [L_{rs}] i_{abc} + [L_r] i_{rotor} \quad (2.16)$$

où

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_f(\theta) & M_{fD}(\theta) & M_{fS}(\theta) \\ M_{Df}(\theta) & L_D(\theta) & M_{DQ}(\theta) \\ M_{Qf}(\theta) & M_{QD}(\theta) & L_Q(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Les matrices $[L_{sr}]$ et $[L_{rs}]$ sont symétriques par conséquent $[L_{sr}] = [L_{rs}]^t$

$$[L_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_{fa}(\theta) & M_{fb}(\theta) & M_{fc}(\theta) \\ M_{fb}(\theta) & M_{Db}(\theta) & M_{Dc}(\theta) \\ M_{fc}(\theta) & M_{Qb}(\theta) & M_{Qc}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\phi_f = M_{fa}(\theta)i_a + M_{fb}(\theta)i_b + M_{fc}(\theta)i_c + L_f(\theta)i_f + M_{fD}(\theta)i_D + M_{fQ}(\theta)i_Q \quad (2.19)$$

$$\phi_D = M_{Da}(\theta)i_a + M_{Db}(\theta)i_b + M_{Dc}(\theta)i_c + L_D(\theta)i_D + M_{fD}(\theta)i_f + M_{DQ}(\theta)i_Q \quad (2.20)$$

$$\phi_Q = M_{Qa}(\theta)i_a + M_{Qb}(\theta)i_b + M_{Qc}(\theta)i_c + L_Q(\theta)i_Q + M_{Qf}(\theta)i_f + M_{QD}(\theta)i_D \quad (2.21)$$

Les équations de tension et de flux ne sont pas linéaires car les inductances dépendent de θ . Cependant, plusieurs transformations de passage d'un repère triphasé à un repère biphasé (Clark, Concordia et Park) permettent la linéarisation du modèle.

La géométrie particulière du rotor conduit tout naturellement à adopter, pour le système de référentiel de la transformation de Park, des axes correspondant à l'axe du système inducteur (axe d) et l'axe interpolaire (axe q).

Les enroulements rotoriques n'auront pas à être transformés en enroulements équivalents puisque les enroulements réels sont déjà localisés selon les axes du référentiel de Park [5].

2.5 Transformée de Park dq

La transformée 'dq' permet dans un système triphasé équilibré de transformer trois quantités alternatives en deux quantités continues [8]. Une fois la solution calculée, la

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

transformation inverse est utilisée pour retrouver les grandeurs triphasées correspondantes. On peut l'utiliser pour transformer des tensions, des courants et des flux. La matrice de changement de repère est donné par:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

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

Le choix des coefficients $\sqrt{\frac{2}{3}}$ et $\sqrt{\frac{1}{2}}$ permet d'avoir une transformée qui conserve la puissance invariante.

$$[X_{dq0}] = P \cdot [X_{abc}] \quad (2.24)$$

$$[X_{abc}] = P^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} \phi_{dq0} = P \cdot \phi_{abc} \\ V_{dq0s} = P \cdot V_{abc} \\ i_{dq0s} = P \cdot i_{abc} \end{cases} \quad (2.26)$$

où

$\Phi_{dq0s} = [\Phi_d \Phi_Q \Phi_0]^t$: Vecteur des flux statoriques en dq

$V_{dq0s} = [V_d V_Q V_0]^t$: Vecteur des tensions statoriques en dq

$i_{dq0s} = [i_d i_Q i_0]^t$: Vecteur des courants statoriques en dq

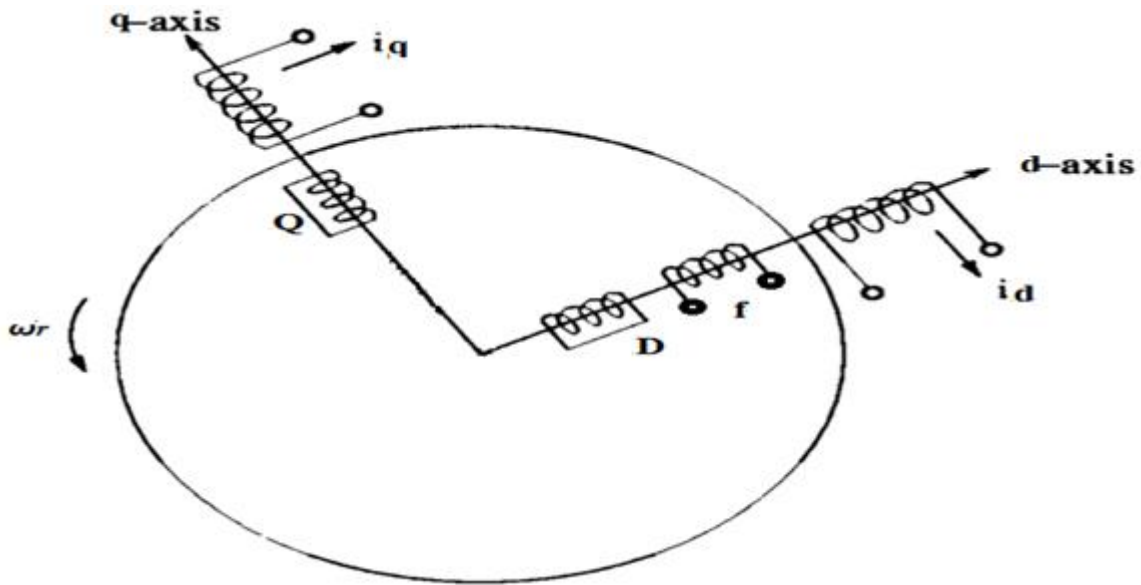


Figure 2.7. Représentation schématique d'une machine synchrone dans le repère de dq.

2.5.1 Equations des tensions

Dans le repère de Park, la machine synchrone en mode moteur est régie par les équations de tensions suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} P^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + P \frac{d}{dt} P^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} P^{-1} + P P^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r & 0 \\ \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Dans un référentiel lié au rotor, on a $\omega_s = \omega_r$

Par conséquent, les tensions de la machine synchrone à rotor bobiné dans le fonctionnement moteur sont données par les expressions suivantes :

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \phi_q \quad (2.30)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \phi_d \quad (2.31)$$

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (2.32)$$

$$V_D = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \quad (2.33)$$

$$V_Q = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \quad (2.34)$$

Dans le repère de Park, la machine synchrone en mode générateur est régie par les équations de tensions suivantes :

$$-V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \phi_q \quad (2.35)$$

$$-V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \phi_d \quad (2.36)$$

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (2.37)$$

$$V_D = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \quad (2.38)$$

$$V_Q = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \quad (2.39)$$

2.5.2 Equations de flux

Comme dans le modèle abc, les expressions de flux sont les mêmes pour les deux modes de fonctionnement. En appliquant la transformée dq aux équations de flux, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = [P][\Phi_{abc}] = [P] \cdot [L_s][P^{-1}] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + [P][L_{sr}] \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

En faisant appel aux équations d'inductances développées précédemment, on aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & M_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

où

L_d : Inductance synchrone longitudinale

L_q : Inductance synchrone transversale

L_0 : Inductance homopolaire

En exprimant dans la matrice des flux rotoriques les inductances par leur expression en fonction de θ , on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{fd} & 0 & 0 \\ M_{Dd} & 0 & 0 \\ 0 & M_{Qq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

d'où

$$\Phi_d = L_d i_d + M_{fd} i_f + M_{Dd} i_D \quad (2.43)$$

$$\Phi_q = L_q i_q + M_{Qq} i_Q \quad (2.44)$$

$$\Phi_f = M_{fd} i_d + M_{Df} i_D + L_f i_f \quad (2.45)$$

$$\Phi_D = M_{Dd} i_d + L_D i_D + M_{Df} i_f \quad (2.46)$$

$$\Phi_Q = M_{Qq} i_q + L_Q i_Q \quad (2.47)$$

En remplaçant les équations de flux obtenues dans les équations de tensions de Park en mode générateur, on obtient l'écriture matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} -V_d \\ -V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_q & 0 & 0 & -\omega_r M_{Qq} \\ \omega_r L_q & R_s & \omega_r M_{fd} & \omega_r M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{Qq} \\ M_{fd} & 0 & L_f & LD & 0 \\ M_{Dd} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

2.6 Equation du couple [5][4]

La puissance instantanée de la machine s'écrit comme suit :

$$P(t) = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c + V_f \cdot i_f \quad (2.49)$$

$$P(t) = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q + 3 \cdot V_o \cdot i_o + V_f \cdot i_f \quad (2.50)$$

Les enroulements amortisseurs étant en court-circuit, ils ne participent pas au bilan de puissance.

L'énergie électrique absorbée pendant un intervalle de temps dt s'exprime par :

$$W_{elec} = [R_s(i_d^2 + i_q^2) + 3R_s \cdot i_o^2 + 3 \cdot V_o \cdot i_o + R_f \cdot i_f^2]dt + [(i_d \cdot d\lambda_d + i_q \cdot d\lambda_q) + 3i_o \cdot d\lambda_d + i_f \cdot \lambda_f^2] + [\omega_m(\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d)dt] \quad (2.51)$$

L'énergie électrique est composée de trois termes :

- Energie perdue par effet joule
- La variation d'énergie magnétique emmagasinée dans le champ de couplage
- L'énergie transformable en énergie mécanique.

$$dW_{mec} = \omega_r(\lambda_d \cdot i_q + \lambda_q \cdot i_d)dt = T_{em} \cdot d\theta_m \quad (2.52)$$

où $d\theta_m = \frac{\omega_r}{p}dt$ (2.53)

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante:

$$C_{em} = p(\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (2.54)$$

Pour une machine synchrone bipolaire, le couple électromagnétique est formulé comme suit:

$$C_{em} = \lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d \quad (2.55)$$

$$C_{em} = C_{rélu} + C_{asyn} + C_{syn} \quad (2.56)$$

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

$C_{rélu}$ est le couple réluctant dû à l'anisotropie et la saillance du rotor. Ce terme disparaît dans le cas d'une machine à rotor cylindrique.

2.7 Alternateur en charge

Le modèle est maintenant complètement caractérisé. La dernière étape consiste à construire le modèle d'état afin de permettre la simulation numérique de la machine synchrone. Les équations électriques de la machine étant déjà établies (équations (2.44) à (2.47)), il ne reste qu'à exprimer le modèle de la charge et à réaliser le couplage. La charge choisie pour effectuer les tests de validation du modèle est linéaire, de type RL couplée en étoile. Son équation différentielle est donnée comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ch} & -\omega_r L_{ch} \\ \omega_r L_{ch} & R_{ch} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ch} & 0 \\ 0 & L_{ch} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

où

V_d, V_q : Tensions statoriques de la machine dans le repère de Park

R_{ch}, L_{ch} : Paramètres de la charge

ω_r : Pulsation électrique de la machine

i_d, i_q : Courants traversant la charge en convention récepteur [14]

Pour déterminer l'équation d'état intégrant à la fois la machine et la charge, il suffit substituer le vecteur de tension de l'équation (2.48) par son expression définie par l'équation de la charge (2.57). L'équation d'état de l'ensemble est exprimée comme suit:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_{ch} & -\omega_r(L_d + L_{ch}) & 0 & 0 & -\omega_r M_{Qq} \\ \omega_r(L_d + L_{ch}) & R_s + R_{ch} & \omega_r M_{fd} & \omega_r M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d + L_{ch} & 0 & M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & L_q + L_{ch} & 0 & 0 & M_{Qq} \\ M_{fd} & 0 & L_f & M_{Df} & 0 \\ M_{Dd} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d + L_{ch} & 0 & M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & L_q + L_{ch} & 0 & 0 & M_{Qq} \\ M_{fd} & 0 & L_f & M_{Df} & 0 \\ M_{Dd} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} R_s + R_{ch} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s + R_{ch} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} + \right.$$

$$\left. \omega_r \begin{bmatrix} 0 & (L_d + L_{ch}) & 0 & 0 & -M_{Qq} \\ (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d + L_{ch} & 0 & M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & L_q + L_{ch} & 0 & 0 & M_{Qq} \\ M_{fd} & 0 & L_f & M_{Df} & 0 \\ M_{Dd} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

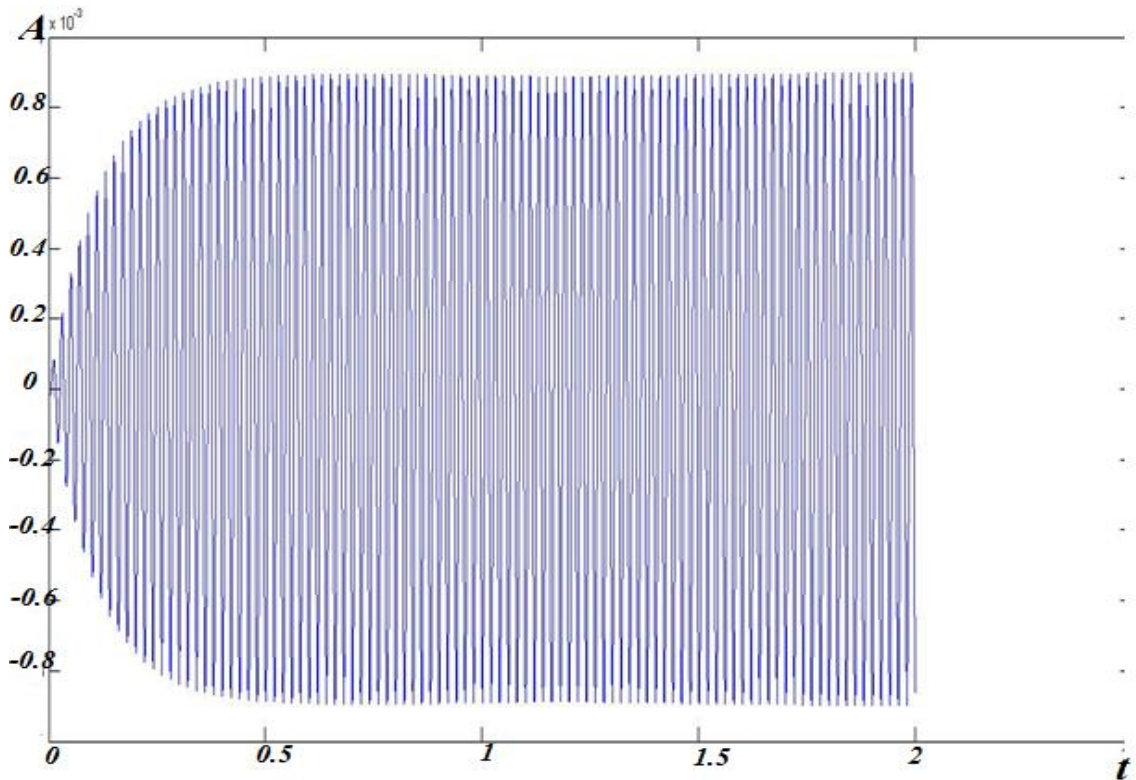
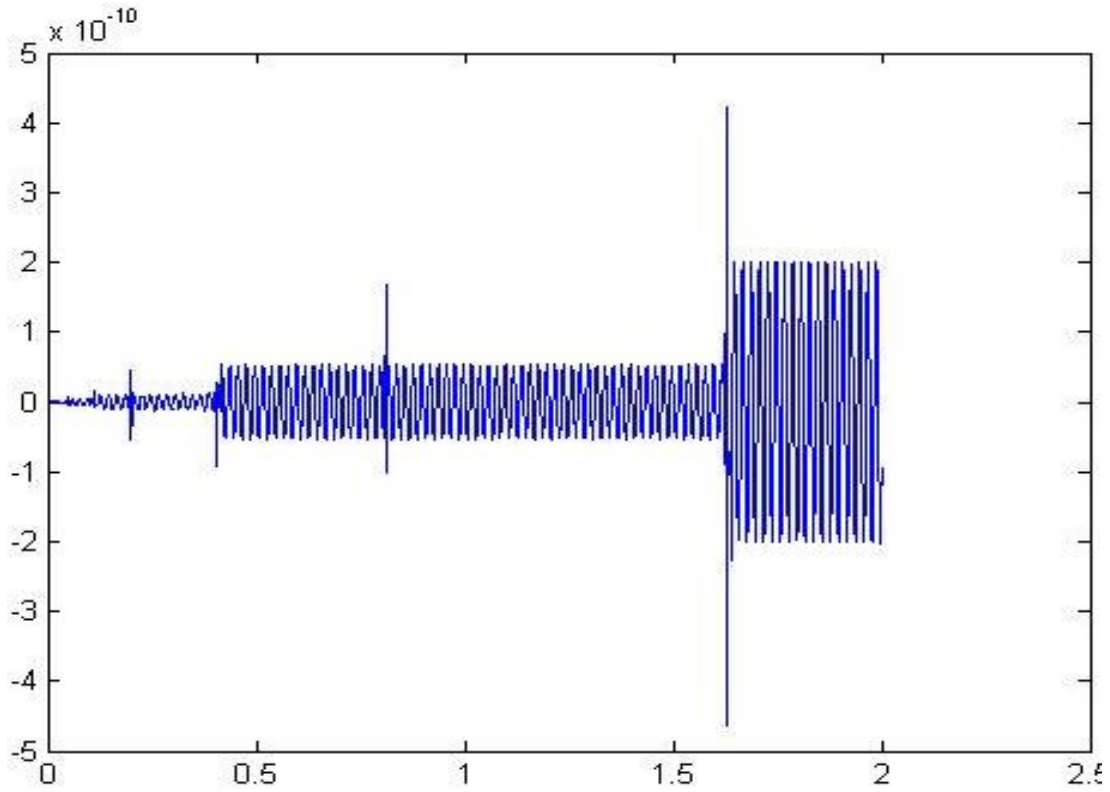
2.8 Simulation

Le modèle d'état de la machine synchrone à rotor bobiné est établi. Pour assimiler le fonctionnement de la machine en mode générateur, nous l'avons simulé par MATABL/SIMULINK. Parmi les problèmes rencontrés dans l'élaboration de ce travail, l'indisponibilité des paramètres du générateur de la centrale électrique Hadjret Ennas où a eu lieu notre stage pratique. Pour contourner le problème, nous avons utilisé les paramètres d'un alternateur similaire au 450H fournis par la référence [16].

a Essai à vide

Dans le fonctionnement à vide, l'impédance alimentée par la machine est infinie donc l'appel du courant tend vers zéro. Les résultats de la simulation de la machine synchrone à rotor bobiné à vide en mode générateur sont donnés par la somme des trois tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} nulle (Figure2.8), par l'appel du courant mesuré sur la phase a (Figure2.9) et par la tension de sortie du générateur sur la phase a (Figure2.10).

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB



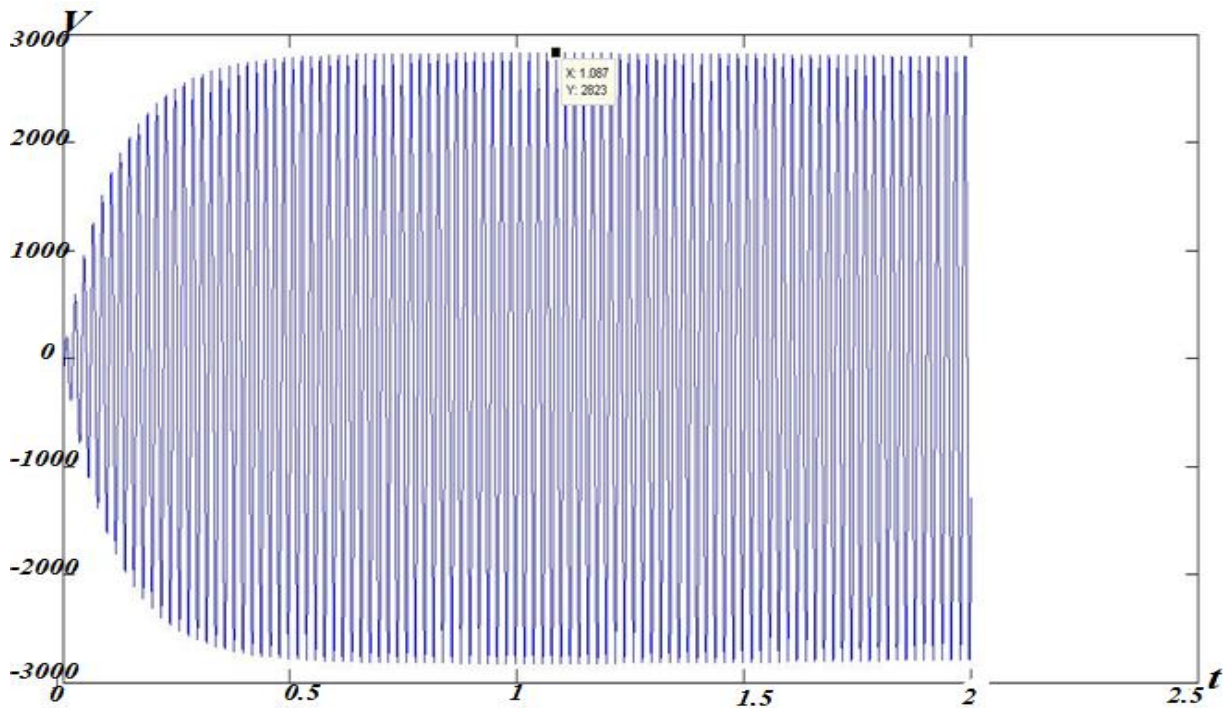


Figure 2.10. Tension de sortie du générateur en fonctionnement à vide sur de la 'phase a'

Remarque

Les mesures effectuées ont été prélevées sur une seule phase vue que la machine est équilibrée.

Lors du démarrage de la machine (régime transitoire), la tension augmente progressivement avec le temps jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur nominale. Cette transition est due aux amortisseurs.

La valeur du courant tend vers zéro vue que le fonctionnement est à vide, la tension de sortie atteint une valeur de 2700V lors du régime permanent.

b Essai en charge

Dans cet essai, la machine débite sur une charge RL couplée en étoile. Les résultats de la simulation de la machine en charge sont donnés en terme de l'appel du courant sur la 'phase a' (Figure2.11) et la tension de sortie prélevée sur la phase a (Figure2.12)

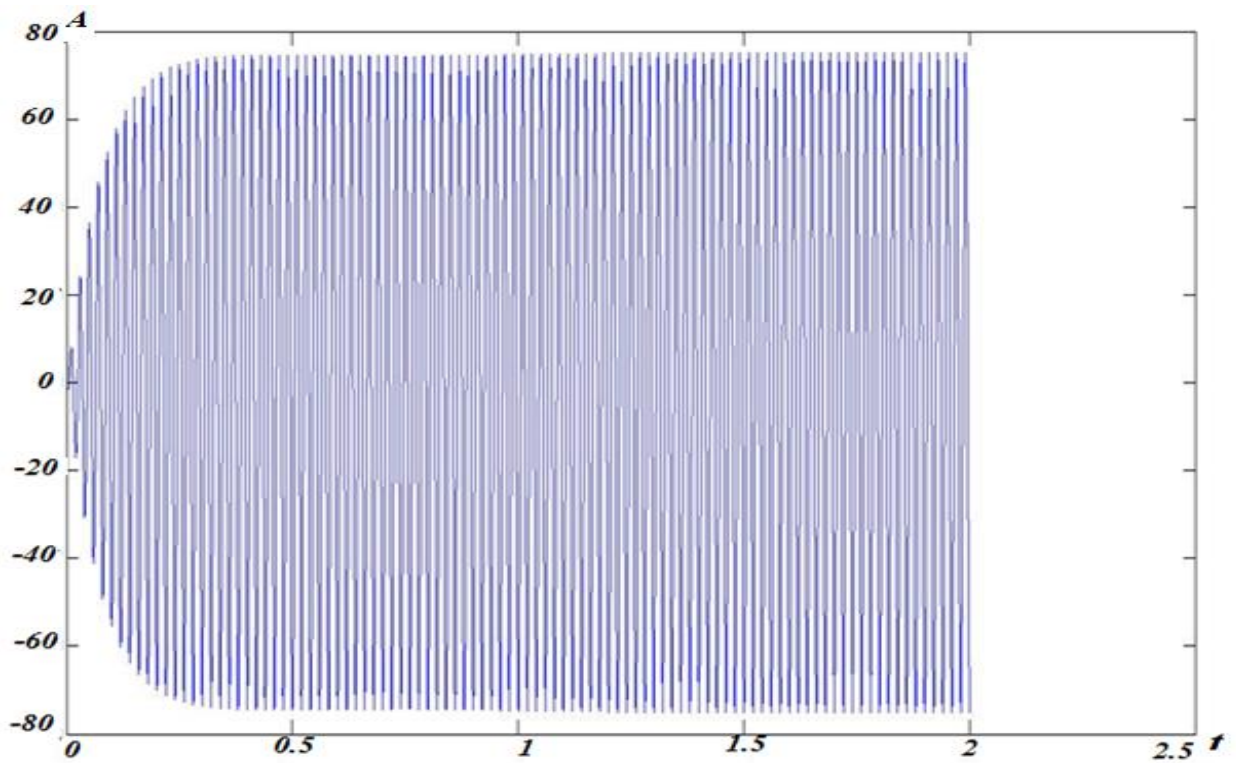


Figure 2.11. L'appel du courant sur la 'phase a' en charge

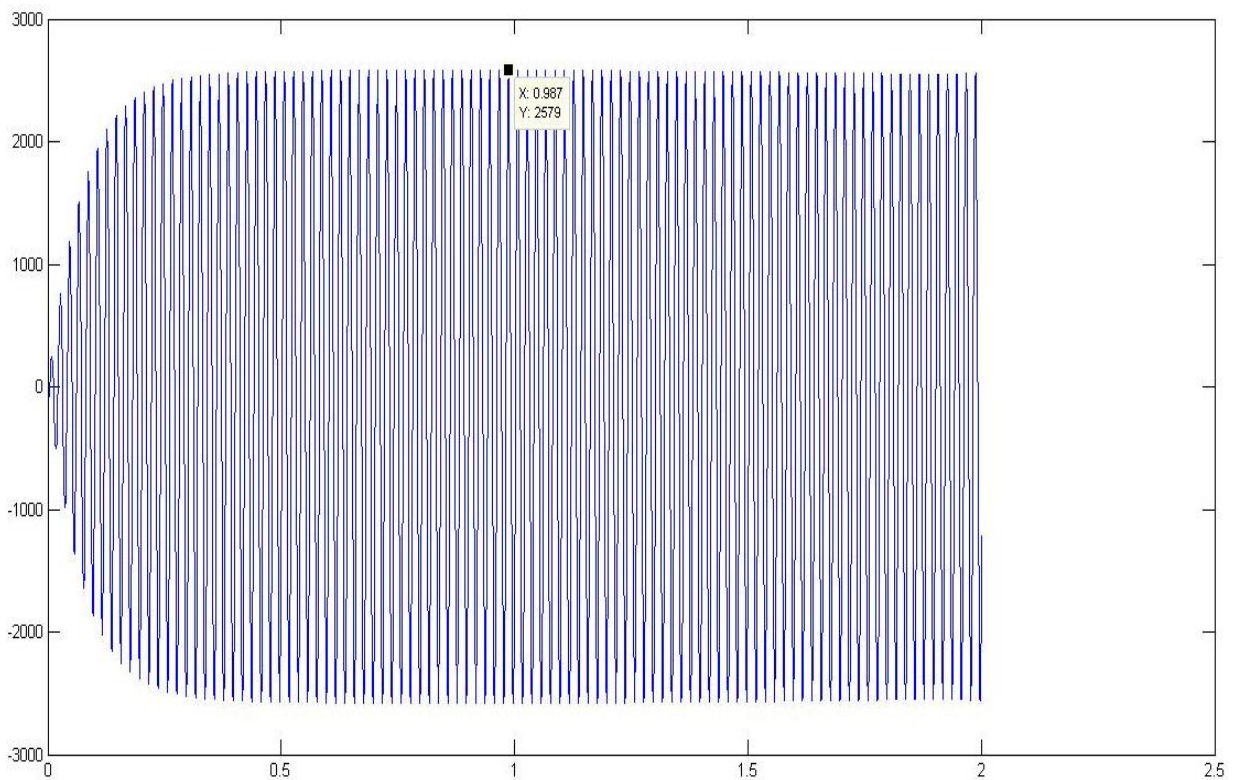


Figure 2.12. Tension de sortie sur la phase 'a' en charge

Chapitre 2 Modélisation de la MSRB

Remarque

Les tensions ne changent pas d'allure, les trois tensions sont équilibrées.

On constate que l'appel du courant est devenu plus important, ce qui signifie que le générateur débite sur une charge.

On remarque que la tension de sortie a chuté de d'environ 300V, ceci est très mauvais pour n'importe quel récepteur.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle d'état de la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) a été développé pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur.

Les résultats de la simulation de la MSRB montrent que la variation de la charge engendre une variation de la tension de sortie de l'alternateur, ceci peut provoquer un dysfonctionnement du système. Pour pallier ce problème, on fait appel à la régulation de la tension de sortie pour la maintenir stable et constante quelque soit la charge alimentée pour assurer le bon fonctionnement en permanence du système.

Chapitre 3 Régulation de tension

3.1 Introduction

La qualité de la tension produite et délivrée aux clients est un enjeu primordial pour les systèmes de production d'énergie. Cependant, les systèmes de régulation sont très divers et très répandus dans les centrales de production. Les systèmes employés remplissent une tâche précise qui contribue à la génération d'une tension de sortie répondant au cahier de charge prédéfinie.

L'étude du générateur synchrone destiné à la production d'énergie électrique, nous a permis de constater que la variation de la charge alimentée engendre des variations considérables de la tension de sortie, la raison pour laquelle dans une centrale de production, un système de régulation de tension est indispensable et sa défaillance signifie l'arrêt de la production. Cependant, la détermination des paramètres du régulateur peut se faire selon deux méthodes :

- Méthodes classiques telles que : Ziegler-Nichols, P. Naslin, Lieu de Nyquist inverse, Diagramme de Black, Astrom , Hagglund.
- Méthodes d'optimisation telles que : PSO, les algorithmes génétiques ...

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes technologies de système d'excitation. Nous déterminons aussi la manière de régulation appliquée à l'alternateur 450H. Les résultats de simulation de la machine sont donnés pour le fonctionnement à vide et en charge.

3.2 Régulation de la vitesse de rotation

La régulation de vitesse est effectuée afin d'avoir une vitesse de rotation fixe et inchangée dans le but de garder la fréquence de la tension de sortie du générateur à une valeur constante déterminé par le réseau (50Hz en Algérie).

Chapitre 3 Régulation de tension

Il existe une variété de régulateurs de vitesse, une variété de technologies et de techniques comme les régulateurs mécaniques et les régulateurs électroniques.

Dans notre travail, la vitesse de rotation est supposée constante sans variation afin de pouvoir mieux étudier la régulation de tension.

3.3 Régulation de tension

Lors de la production, la régulation de tension dépend exclusivement du courant d'excitation qui agit sur le champ d'induction magnétique et par la suite sur la tension de sortie.

Le développement intervenu dans la technique d'excitation des machines synchrones a apporté sur le marché un grand nombre de système d'excitation très divers au cours des dernières années.

Partant du principe qu'il faut élever la sécurité de service du système d'excitation et par suite la disponibilité des installations, deux circonstances ont influencé le développement d'une façon décisive.

D'une part, la demande d'énergie de plus en plus croissante a ramené les constructeurs à fabriquer des machines de plus en plus grandes, donc un besoin en énergie d'excitation plus élevé a conduit vers l'abandon des modes d'excitations classiques et les remplacer par l'excitation couplée avec l'arbre de production soit directement soit par l'intermédiaire d'un mécanisme de transmission.

D'autre part, avec le développement des semi-conducteurs, les redresseurs ont permis de concevoir des systèmes d'excitation commandés, robustes, de puissance élevée et fiable dont l'utilisation est aujourd'hui le point de départ de tout système d'excitation moderne.

3.3.1 Le principe de fonctionnement d'un système d'excitation

La valeur de la tension induite dans un enroulement d'alternateur dépend des facteurs suivants:

- la vitesse de rotation de l'alternateur (V)
- l'intensité du champ magnétique (B)
- la longueur du conducteur placé dans le champ magnétique (L)

$$E = B.L.V \tag{3.1}$$

Chapitre 3 Régulation de tension

Etant donné que la vitesse de rotation de l'alternateur doit rester constante et la longueur du conducteur est fixe, alors le facteur déterminant est l'intensité du champ magnétique. L'intensité du champ magnétique ou densité des lignes de force dépend du courant d'excitation, qui lui-même dépend de la tension d'excitation (loi d'Ohm). C'est à dire qu'en faisant varier le courant d'excitation (ou la tension), on peut faire varier la tension aux bornes de l'alternateur. Le système d'excitation de l'alternateur est la source du courant continu créant le champ dans l'alternateur [10].

Les alternateurs synchrones à rotor bobiné dans les centrales électriques doivent être équipés d'un système d'excitation, afin de contrôler la tension entre ses terminaux, et éliminer toutes les perturbations possibles. L'importance de cette régulation dans le système d'écoulement de puissance nécessite l'utilisation d'un système d'excitation robuste.

La fonction de base de l'excitation est de fournir un courant continu nécessaire aux bobines créant le champ au rotor de la machine synchrone afin de faire varier la tension et la puissance réactive, et aussi pour certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines). Plusieurs topologies sont disponibles pour la génération du courant continu ' i_{fd} ' alimentant l'enroulement rotorique.

3.3.2 Différents types de système d'excitation

Un système d'excitation a un grand impact sur le fonctionnement du générateur car le courant d'excitation fourni doit maintenir un point de fonctionnement stationnaire. Il existe plusieurs systèmes d'excitation avec des topologies et des caractéristiques différentes. Une bonne régulation doit satisfaire les trois conditions suivantes :

- Rapidité: le temps de réponse est court lors de la régulation [8]
- Amortissement/stabilité : un bon amortissement est la capacité d'un système oscillant à être suffisamment amorti et à ne pas présenter de dépassement important. Le nombre d'oscillations avant stabilisation devra être faible. Le système ne doit pas être excessivement amorti car l'augmentation de l'amortissement provoque une diminution du rendement du système
- Précision: les erreurs statique et dynamique sont évaluées

Chapitre 3 Régulation de tension

Chacune des technologies disponibles pour les systèmes d'excitation présentent des avantages et des inconvénients, c'est la raison pour laquelle le choix d'un système d'excitation doit se faire suivant plusieurs critères.

Parmi les configurations possibles les plus répandus pour un système d'excitation, on peut citer :

- Excitation avec moteur à courant continu
- Excitation avec aimant permanent
- Excitation avec un pont de diodes fixes
- Excitation avec pont redresseur tournant (dynamique)
- Excitation avec un pont de thyristors fixe
- Excitation avec un système hybride

a Excitation avec moteur à courant continu

Le transformateur de tension transmet la tension de sortie de l'alternateur principale au détecteur qui la compare à une tension de référence. L'écart réalisé agit sur le régulateur de tension qui fournit la puissance d'excitation à l'excitatrice, celle-ci commande l'excitatrice de l'alternateur de manière à réduire l'écart. Un alternateur auxiliaire monté en bout d'arbre alimente le régulateur.

Ce type d'excitation peut être très pratique pour les turbo-alternateurs allant jusqu'à une puissance de 100 MVA. Ce système offre une possibilité d'inversion des paramètres rotoriques courant et tension, la possibilité de désexcitation ou surexcitation lors des défauts.

En revanche, le système présente des inconvénients qui le rendent moins pratique. La maintenance préventif doit être garantie régulièrement pour le côté mécanique surtout, ce qui augmente les coûts et le temps de la mise hors service.

b Excitation avec aimant permanent

Le développement intervenu dans la conception des aimants modernes, tels que les aimants au NICOTAL isotropes (unidirectionnels) a permis la construction d'excitateurs à aimants permanents pour les machines de faibles puissances. C'est une méthode plutôt économique.

Chapitre 3 Régulation de tension

c Excitation avec un pont de diodes fixes

Ce système d'excitation se compose essentiellement d'un alternateur auxiliaire, d'un pont de diodes fixes, d'un dispositif de régulation et d'un système de désexcitation. Le régulateur de tension est alimenté par l'intermédiaire de l'alternateur principale.

Ce dispositif rend l'excitation de choc à la sortie du régulateur pratiquement proportionnelle à celle de l'alternateur. L'amorçage de l'excitation de l'alternateur recourt à la rémanence de l'alternateur lui-même et à celle de l'alternateur auxiliaire.

d Excitation avec pont redresseur tournant (dynamique)

Ce système d'excitation comprend un pont de diodes tournantes alimentées par un alternateur auxiliaire entraîné le plus souvent en bout d'arbre de l'alternateur principal.

Les alternateurs sans bagues ni balais ont leurs extrémités de bobinage reliées aux pôles positive et négative du pont de diodes tournantes. La partie tournante est en rouge, cette solution peut être utilisée pour les différentes puissances des turbo-alternateurs et ne nécessite aucun contact glissant. Mais on note que la mesure directe du courant est impossible plus la difficulté de la réalisation de ce système.

e Excitation avec un pont de thyristors fixe

Ce système présente une grande robustesse. Il peut être associé aux différentes puissances des turbo-alternateurs. La présence d'un pont de thyristors permet d'agir sur l'angle d'amorçage d'une manière automatique afin de faire varier la tension ou l'inverser selon le cas. L'alimentation peut être assurée par un transformateur de soutirage ou par le biais d'un alternateur auxiliaire.

f Excitation avec un système hybride

On désigne par ce type d'excitation, une excitation par aimant permanent et par méthodes électromagnétiques.

3.3.3 Régulation de tension et de puissance réactive

Le générateur synchrone, le régulateur et l'excitatrice forment un système en boucle fermé qui est le système de régulation automatique de tension. Ce système est le même pour les différents types d'excitation qui existent. Le régulateur automatique de tension AVR reçoit la

Chapitre 3 Régulation de tension

tension mesurée aux bornes du générateur pour ajuster la tension d'excitation qui affectera la tension de sortie du générateur, et c'est ainsi que le système de régulation automatique de tension accomplit sa tâche.

Le rôle de l'AVR est de maintenir la tension aux bornes du générateur à une valeur spécifiée, car un déséquilibre quelconque affectera l'écoulement de puissance sur le réseau ce qui est néfaste pour le système. La figure 3.1 montre le système de régulation de tension.

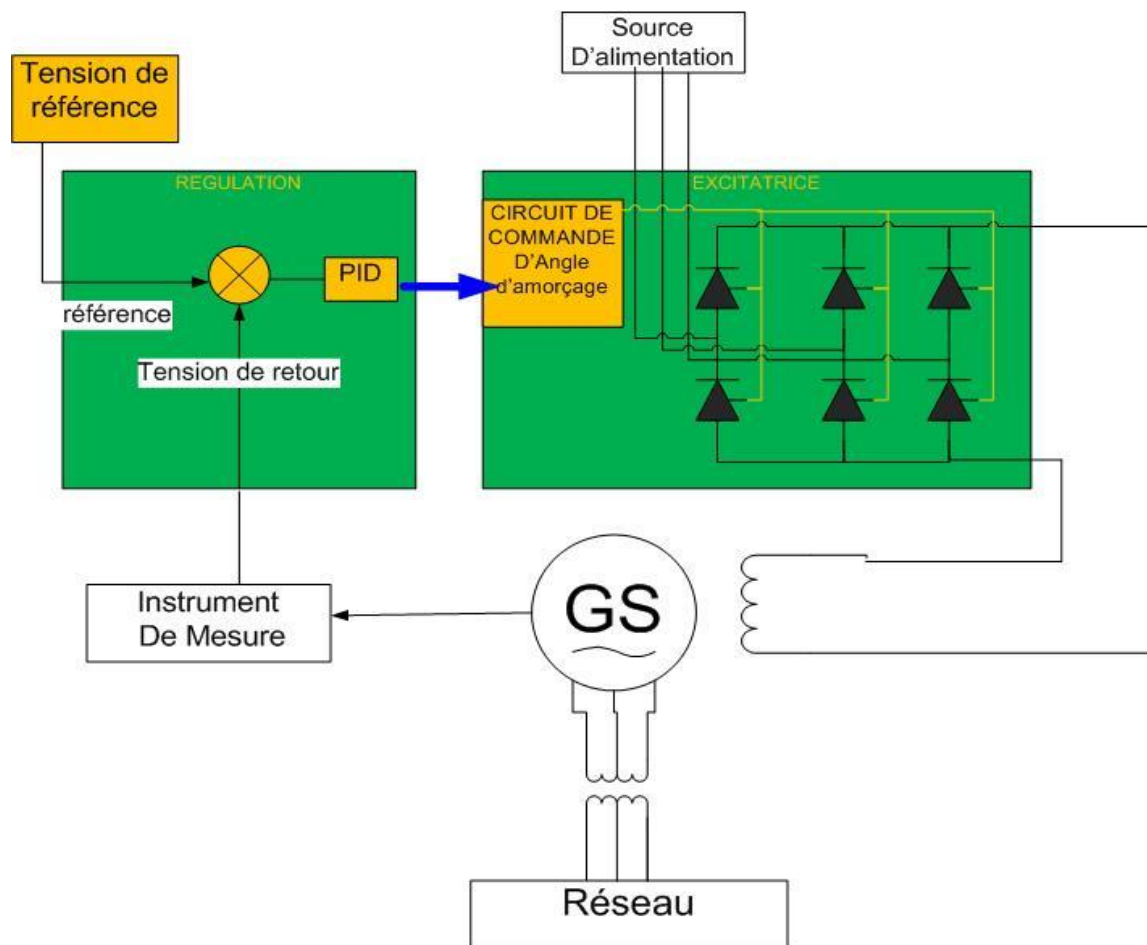


Figure 3.1. Schéma d'un système de régulation de tension

Le système de régulation de tension de la figure 3.1 comporte les maillons suivants :

- Excitatrice : c'est la partie puissance du système d'excitation, sa fonction est de fournir un courant continu aux enroulements rotoriques.
- Régulateur : assure la régulation à partir des signaux reçus par d'autres blocs
- Instrument de mesure : mesure la tension aux bornes du générateur afin de fournir une tension de retour au bloc de régulation.

Chapitre 3 Régulation de tension

Remarque

L'unité de contrôle d'amorçage agit sur l'angle d'amorçage des thyristors 'PT3' afin de varier la tension d'excitation.

Les différentes charges passives (inductive ou capacitive) ou actives (moteurs) demandent de la puissance active et de la puissance réactive en fonctionnement normal. Le système de production d'énergie électrique doit répondre aux besoins imposés par la charge en ce qui concerne la puissance réactive tout en gardant la tension à une marge acceptable. Le rôle du régulateur de tension est de réguler la tension de sortie et la puissance réactive. Le réglage de la puissance réactive ne doit pas perturber la tension de sortie.

On distingue deux méthodes pour la régulation de la tension et de la puissance réactive :

- Régulation de la tension d'excitation du générateur synchrone en utilisant un régulateur de tension automatique AVR.
- Inductance et condensateur de puissance placés dans divers points du réseau électrique.

La première méthode est appliquée dans les centrales de production tandis que la deuxième est appliquée dans le système de transmission et de distribution. La première méthode sera détaillée dans ce qui va suivre.

3.4 Système de régulation de tension proposé

Le maintien de la stabilité statique et de la stabilité dynamique en régime perturbé, la rapidité de rétablissement de la tension après une variation ou défaut, la fiabilité du système et du matériel conduisent à favoriser dans la plupart des cas les systèmes d'excitation à réglage direct de la tension rotorique aux systèmes à excitatrice tournante. De nos jours, une ligne d'arbre plus courte donc bâti de fondations plus court, un niveau de bruit plus faible, une élimination d'entretien et une minimisation du coût d'investissement sont fortement appréciés. C'est pourquoi l'évolution récente des systèmes d'excitation a tendance à écarter les méthodes utilisant une excitatrice pour se pencher beaucoup plus sur les systèmes d'excitation statique [3]. Les systèmes d'excitation statique alimentés par soutirage aux bornes de l'alternateur s'appliquant à des machines de très grande puissance

Chapitre 3 Régulation de tension

permettent de réduire le temps de réponse de l'ensemble de la chaîne à quelques millisecondes.

Le système proposé est largement appliqué dans les centrales électriques telles que la centrale électrique à cycle combiné de Hadjret Ennas développée dans le premier chapitre.

La tension aux bornes de l'alternateur passe par un transformateur de soutirage pour avoir la tension appropriée à l'alimentation de l'excitation. L'instrument de mesure est connecté aux bornes de l'alternateur afin de fournir une tension de retour au comparateur. Ce dernier compare la tension de référence imposée par l'opérateur avec la tension de retour délivrée par l'instrument de mesure. Le comparateur génère une erreur (écart) qui sera délivrée au régulateur. Ce dernier agit sur un circuit de commande des angles d'amorçage des thyristors afin faire varier la tension d'excitation. La régulation nécessite l'emploi d'un correcteur dont le choix dépend de plusieurs facteurs.

3.4.1 Modélisation du système de régulation

La régulation consiste à agir d'une façon à ce qu'une mesure soit égale à une consigne. Si l'on cherche à atteindre une consigne (de position ou de température par exemple), dans ce cas on parle d'asservissement. Si l'objectif est d'éliminer les perturbations pour qu'une valeur reste constante comme le fait de maintenir la température intérieur fixe quel que soit la température extérieure, là on parle de régulation. Dans les applications industrielles, les deux systèmes sont largement utilisée afin d'affiner la qualité de production [15].

Dans ce travail, on cherche à maintenir la tension de sortie du générateur à une valeur constante pour assurer une bonne qualité d'alimentation. Le système de régulation étudié est illustré dans la figure 3.2.

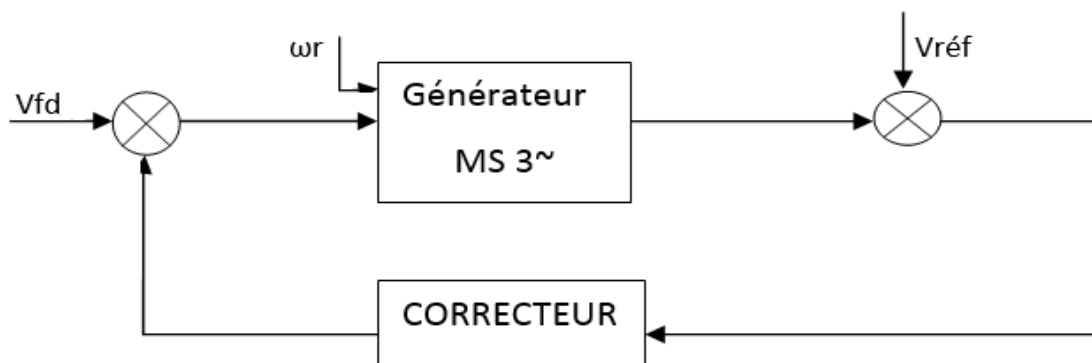


Figure 3.2. Le système de régulation étudié

Chapitre 3 Régulation de tension

3.4.2 Principaux types de régulateur (correcteur)

Le choix approprié du type de régulateur a une grande importance. Dans notre travail, on s'intéresse aux régulateurs analogiques. Un système asservi doit être suffisamment robuste pour garantir trois critères de performance: sa stabilité, une bonne précision statique et une rapidité suffisante. Le problème qui se pose est qu'on doit trouver un bon arrangement pour assurer les trois critères de performance car un système précis doit avoir un gain élevé alors que le gain trop élevé influence la stabilité et rend le système en question instable. L'objectif est de trouver un compromis entre les trois critères pour que le régulateur optimise au mieux la réponse du système [9].

L'action Proportionnelle P corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler. Elle permet de vaincre les grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande passante) mais on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.

Les formes les plus courantes qui s'ajoutent à l'action proportionnelle sont :

- L'action intégrale I complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse). On diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en boucle fermée. En compensant les inerties dues au temps mort, l'action intégrale accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou d'une variation subite de la consigne.
- L'action dérivée D est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les oscillations dues à une variation subite de la consigne. L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.

Chapitre 3 Régulation de tension

Ces actions s'effectuent généralement sur le signal d'erreur. Un régulateur PI regroupe les deux actions proportionnelle et intégrale, un régulateur PD regroupe l'action proportionnelle et dérivative alors que le PID regroupe les trois actions en même temps.

3.4.3 Performances d'un système asservi

a Précision du système

Un système est précis si pour une entrée $e(t)$ donnée, l'écart $\varepsilon(t)$ entre $e(t)$ et le retour $r(t)$ tend vers zéro quand 't' tend vers l'infini. Il s'agit de l'écart en régime permanent [15].

b Stabilité d'un système

Un système linéaire est dit stable lorsqu'en absence d'entrée, la sortie tend vers zéro quelque soient les conditions initiales. Pour toute entrée du système bornée, on associe une sortie bornée aussi, on parle de B.I.B.O (bounded input bounded output).

c Rapidité d'un système

Un système est rapide, si son temps de réponse est court. Le temps de réponse définit la durée du régime transitoire.

3.4.4 Correcteurs PI, PD, PID

Les correcteurs disponibles sont nombreux, et le choix du correcteur est difficile vu l'embarrât du choix. Dans ce qui suit, nous présentons les correcteurs classiques les plus répandus afin d'utiliser l'un d'eux dans notre système à modéliser.

a Correcteur PI

La loi de commande du correcteur PI est régie par l'expression suivante:

$$U(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt \right) \quad (3.2)$$

La fonction de transfert du correcteur PI est donnée par l'équation suivante:

$$C(p) = K_p \frac{1 + pT_i}{pT_i} \quad (3.3)$$

Chapitre 3 Régulation de tension

L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, alors tous les signaux sont constants. Or, pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate.

b Correcteur PD

La loi de commande du correcteur PD est régie par l'expression suivante:

$$U(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.4)$$

La fonction de transfert du correcteur PI est donnée par l'équation suivante:

$$C(p) = K_p (1 + T_d p) \quad (3.5)$$

La correction PD ramène une avance de phase importante. Il est caractérisé par un gain infini en HF. Tous les bruits sont amplifiés, ceci donne un rapport signal/bruit tendant vers 0 en valeur naturelle. Le signal de réglage U_r est inexploitable. Ce phénomène caractérise les fonctions de transfert dont le degré de numérateur est supérieur à celui du dénominateur pour cela de tels correcteurs ne sont pas physiquement réalisables (causalité). En d'autre terme l'examen de son diagramme de Bode montre que son gain $A(\omega)$ tend vers l'infini en même temps que la fréquence du signal, ceci implique que la puissance va tendre vers l'infini. En pratique l'action dérivée est filtrée en ajoutant un élément de premier ordre.

L'action dérivée pur $T_d p$ devient alors $\frac{T_d p}{1 + a T_d p}$ et la fonction de transfert d'un régulateur PD

réalisable devient :

$$C(p) = K_p \left(1 + \frac{T_d p}{1 + a T_d p} \right) \quad (3.6)$$

où

a : Coefficient ajustable nommé facteur d'avance de phase. Sa valeur est comprise entre 0.1 et 0.2

Chapitre 3 Régulation de tension

c Correcteur PID

La loi de commande du correcteur PD est régie par l'expression suivante:

$$U(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + T_d \frac{d e(t)}{dt} \right) \quad (3.7)$$

La fonction de transfert du correcteur PI est donnée par l'équation suivante:

$$C(p) = K_p \left(\frac{1 + pT_i + p^2 T_i T_d}{pT_i} \right) \quad (3.8)$$

L'association des trois actions P, I et D fournit un correcteur proportionnel, intégral et dérivé PID. Il existe plusieurs façons d'associer les trois actions.

On distingue essentiellement, le correcteur PID parallèle et le correcteur PID mixte. Le PID parallèle est l'un des correcteurs le plus modéré car le gain n'agit pas sur les actions intégrale et dérivée. Cependant, le plus énergique est le correcteur PID mixte, car le gain agit sur les deux autres actions.

L'efficacité du correcteur PID ressort du fait qu'il regroupe les trois actions simultanément.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes de régulation dans la production de l'énergie électrique. La robustesse d'un système de régulation de tension est un critère important afin de garantir une bonne qualité de tension de sortie. Le système de régulation adopté doit atteindre les performances maximales afin d'éviter toutes sortes de variation de tension, pour cela on doit déterminer les paramètres optimaux du correcteur PID utilisé dans le système étudié.

La détermination des paramètres du régulateur peut se faire par des méthodes classiques ou bien en utilisant des techniques d'optimisation. Dans ce travail, nous utilisons une méthode stochastique (PSO) pour déterminer les paramètres du régulateur de tension.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'optimisation d'un système de régulation de tension par une méthode stochastique (PSO) pour une éventuelle application à une centrale électrique.

Dans un premier temps, les différentes technologies de production de l'énergie électrique ont été présentées. L'alternateur constitue le dénominateur en commun dans la production électrique. L'alternateur est généralement une machine synchrone fonctionnant en mode générateur.

Dans un second temps, le modèle d'état de la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) a été développé pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur. Les résultats de la simulation de la MSRB à vide et en charge ont montré que la variation de la charge engendre une variation de la tension de sortie de l'alternateur, ceci peut provoquer un dysfonctionnement du système.

Pour pallier ce problème, on a fait appel à la régulation de la tension de sortie pour la maintenir stable et constante quelque soit la charge alimentée.

Ensuite, nous avons présenté les systèmes de régulation dans la production de l'énergie électrique. Le système de régulation adopté doit atteindre des performances maximales afin d'éviter toute sorte de variation de tension, pour cela on doit déterminer les paramètres optimaux du correcteur PID utilisé dans le système.

La détermination des paramètres du régulateur peut se faire selon les méthodes classiques ou les méthodes d'optimisation.

Dans ce travail, nous avons développé l'algorithme d'essais particuliers (PSO) pour optimiser les paramètres du régulateur de tension.

Enfin, les résultats de simulation pour différentes charges ont montré que la tension de sortie suit parfaitement la consigne, pour les paramètres optimisés par PSO.

Comme perspectives la mise en œuvre d'un banc d'essai constitué d'une machine synchrone, nous permettra d'implémenter et de tester d'autres structures de régulateur.

Chapitre 4 Optimisation et simulation

4.1 Introduction

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant la solution optimale dans un espace de recherche prédéfini. De ce fait, l'optimisation est omniprésente dans tous les domaines et évolue sans cesse depuis Euclide. Plusieurs méthodes d'optimisation sont proposées dans la littérature [17, 18, 19], et peuvent être classées comme suit :

- Méthodes déterministes
- Méthodes stochastiques

Les méthodes déterministes utilisent les informations (continuité, dérivabilité) sur les valeurs au point courant de la fonction objectif. Cependant, elles convergent vers l'optimum local le plus proche du point initial. Par contre, les méthodes stochastiques ne nécessitent aucune connaissance à priori sur la fonction objectif. Elles sont capables de localiser l'optimum global en se basant sur une recherche probabiliste. Ces méthodes sont dédiées particulièrement aux problèmes de grande taille. Parmi ces méthodes stochastiques, on peut citer les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, PSO ...

Les domaines d'applications des méthodes stochastiques sont très vastes. Elles sont utilisées pour l'optimisation de fonction [20], finance, théorie du contrôle optimal, théorie des jeux, identification des paramètres des machines électriques.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'optimisation par essais particuliers pour la détermination des paramètres du régulateur de tension [10].

Chapitre 4 Optimisation et simulation

4.2 Algorithme d'essaims particulaires

Les algorithmes d'essaims particulaires connus sous le nom de 'particules warm optimization' (PSO) ont été introduits par Kennedy et Eberhart [21]. Ces algorithmes s'inspirent de particules (des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture.

- Les individus de l'algorithme sont appelés particules (agents). Chaque particule représente une combinaison de paramètres du régulateur. Pour un régulateur PID, la particule est caractérisée par les paramètres K_p , K_i et K_d

| | | |
|-------|-------|-------|
| K_p | K_i | K_d |
|-------|-------|-------|

Figure.4.1 Constitution d'une particule d'essaim

- Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de la configuration adoptée du voisinage.
- Les nouvelles vitesses et directions de la particule seront définies en fonction de trois tendances : la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin (figure 2.2).

4.2.1 Développement de l'algorithme d'essaims particulaires

Les algorithmes d'essaims particulaires peuvent être formulés comme suit :

Un essaim de particules est caractérisé par :

- Le nombre de particules N
- La vitesse maximale d'une particule
- L'inertie d'une particule C_1
- Les coefficients C_2 et C_3 de confiance qui pondèrent le comportement conservateur

Une particule est caractérisée à l'instant t par :

- Sa position $X_i(t)$ dans l'espace de recherche
- Sa vitesse $V_i(t)$

Chapitre 4 Optimisation et simulation

- La position pbest de la meilleure solution par laquelle est passée $X_i(t)$
- La position gbest de la meilleure solution connue dans son voisinage

Les équations de la vitesse et celle du déplacement sont données respectivement par les expressions suivantes :

$$V_{k+1} = C_1 * V_k + C_2 * rand * (pbest - X_k) + C_3 * rand * (gbest - X_k) \quad (4.1)$$

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (4.2)$$

où

C_1 : Coefficient de décélération

C_2 : Coefficient de confiance de la particule en son record

C_3 : Coefficient de confiance en voisinage

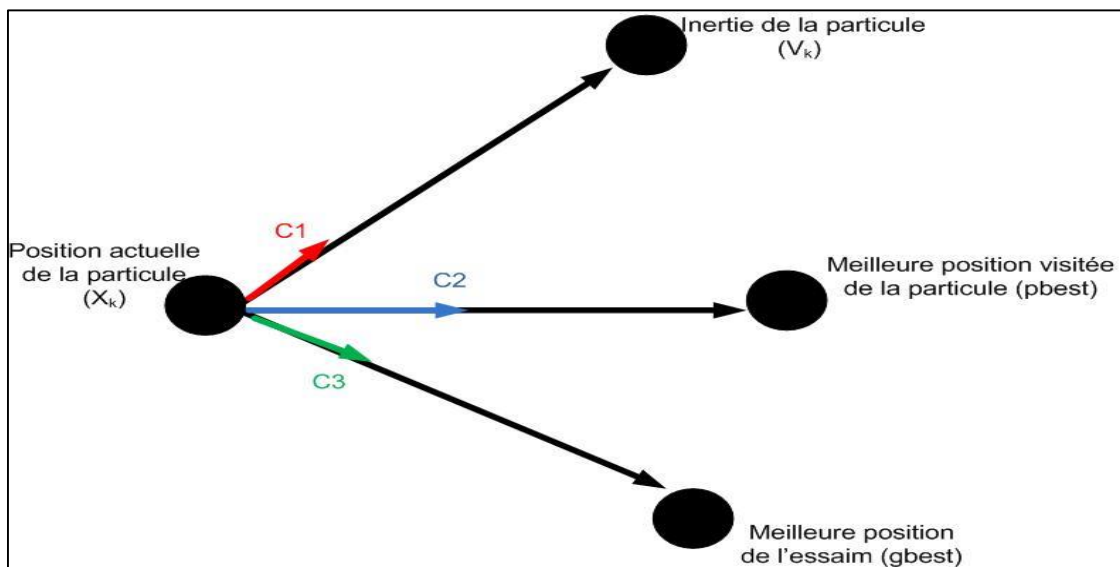


Figure.4.2 Déplacement d'une particule d'essaim

Le développement d'un algorithme d'essaims particulaires passe par les étapes suivantes :

- Choisir le codage
- Choisir le vecteur contrôle (taille des particules N , C_1 , C_2 et C_3)
- Génération d'une population initiale aléatoire de particules de taille fixe N
- Définir la fonction objectif
- Sélectionner le critère d'arrêt

Chapitre 4 Optimisation et simulation

Les différentes étapes de l'algorithme sont répétées jusqu'à satisfaction du critère de convergence. La figure 4.3 présente l'organigramme d'un algorithme d'essais particulaires.

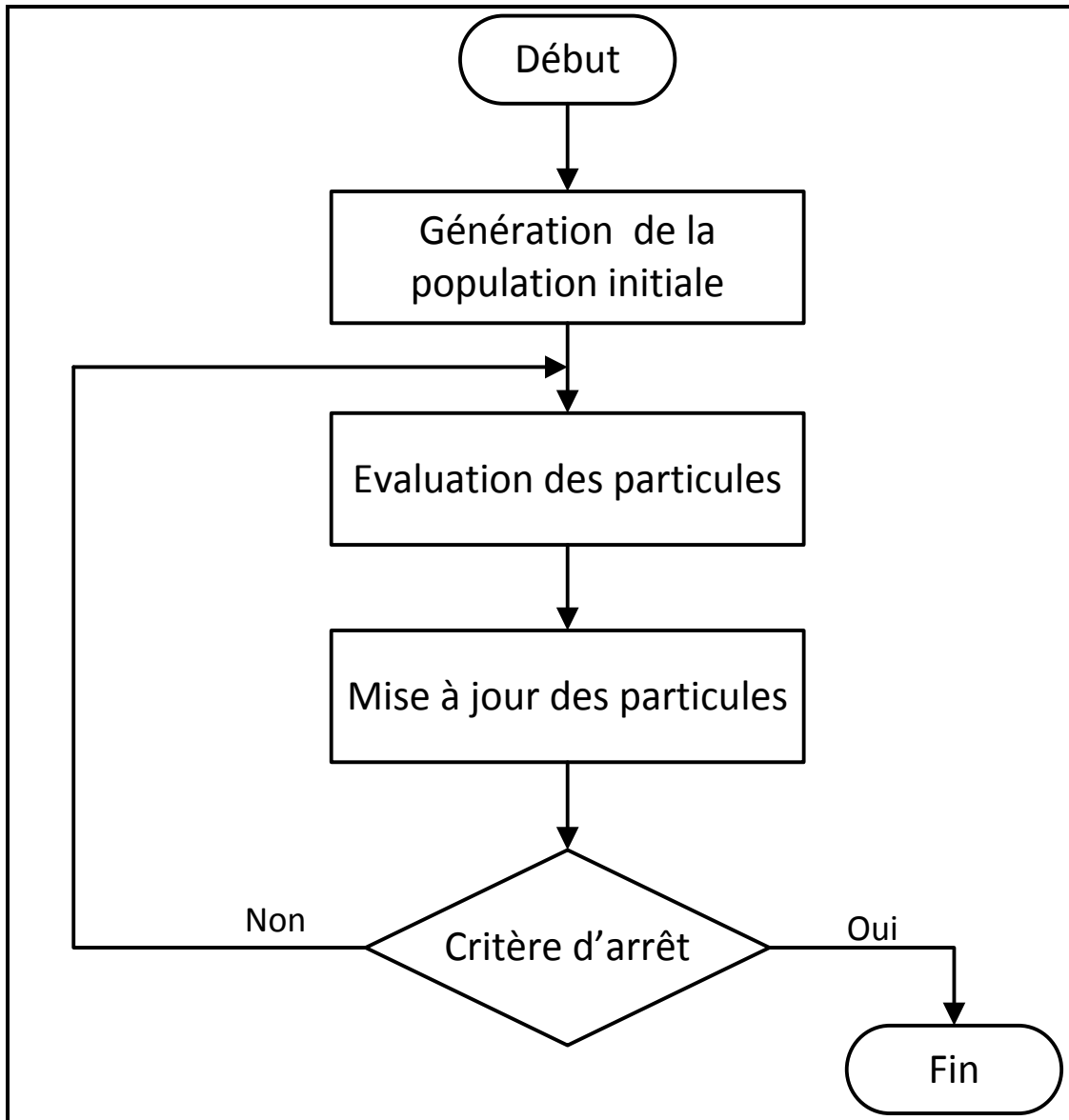


Figure.4.3 Organigramme de PSO

4.3 Optimisation du régulateur par PSO

L'optimisation des paramètres du régulateur est réalisée par PSO. La figure 4.4 présente l'évaluation d'une particule (régulateur) par un processus itératif. La tension de consigne fixée au préalable est comparée à la tension de sortie. L'écart ε entre ses deux tensions est transmis au régulateur dont les paramètres sont optimisés par PSO dont la fonction objectif est donnée par l'expression suivante :

Chapitre 4 Optimisation et simulation

$$e = \sum (V_{asm} - consigne)^2 \quad (4.3)$$

où

V_{asm} : Tension mesurée

Généralement, la tension de consigne est choisie comme tension nominale mais pour les systèmes de puissance la consigne est prise en valeur efficace.

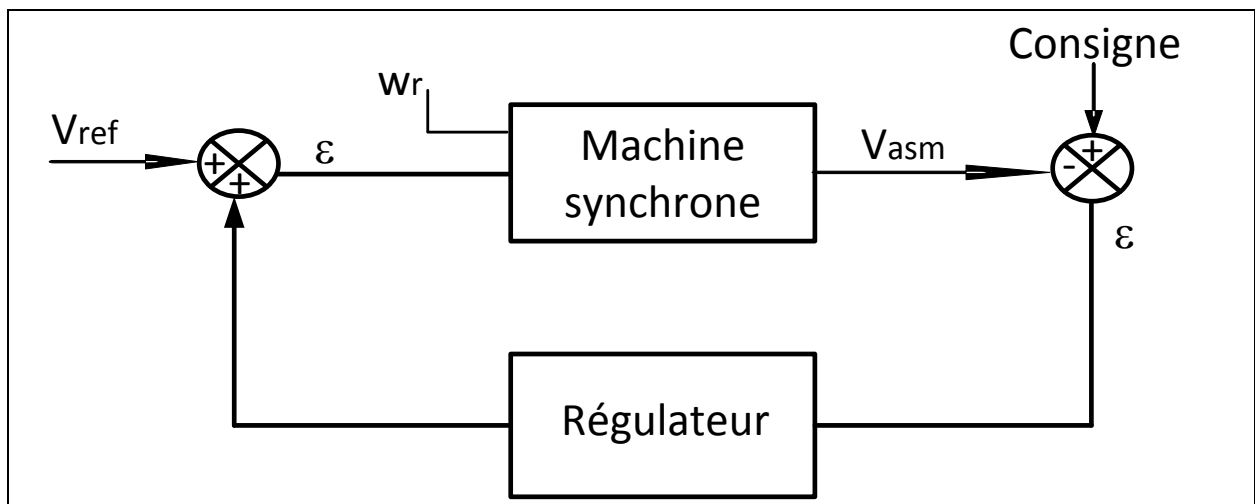


Figure.4.4 Evaluation d'un régulateur

4.4 Résultats de simulation

La simulation est réalisée par interaction entre le MATLAB et Simulink. Pour fournir les courants de Park (i_d, i_q, i_f, i_D, i_Q) et le temps t , nous avons développé un programme de Range-Kutta d'ordre 4. L'estimation de l'erreur ε et l'optimisation des paramètres du régulateur sont établies par la combinaison d'un programme de PSO développé et d'une boucle de régulation réalisée sur SIMULINK.

La figure 4.5 présente la consigne fixée à 800 V. Les figures 4.6, 4.7, 4.8 illustrent respectivement la tension efficace mesurée à la sortie du générateur, l'écart entre la consigne et la tension de sortie du générateur et la somme des trois tensions de sortie.

Chapitre 4 Optimisation et simulation

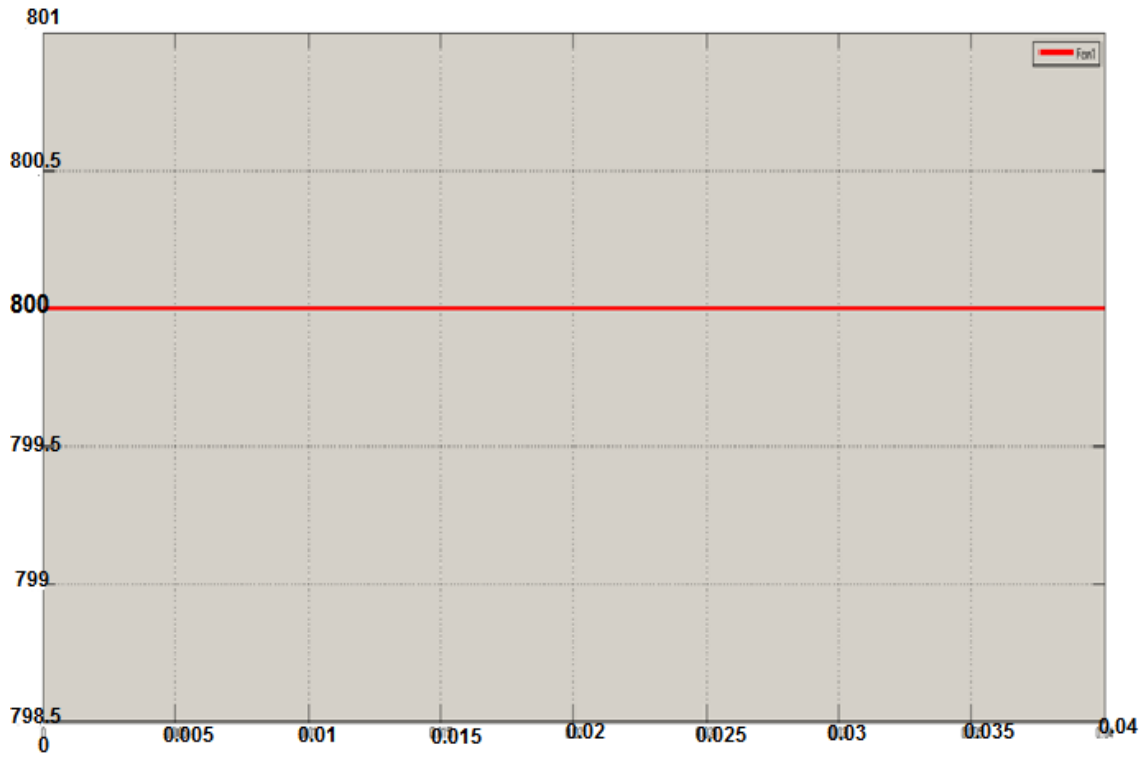


Figure.4.5 Tension de référence imposée par l'opérateur

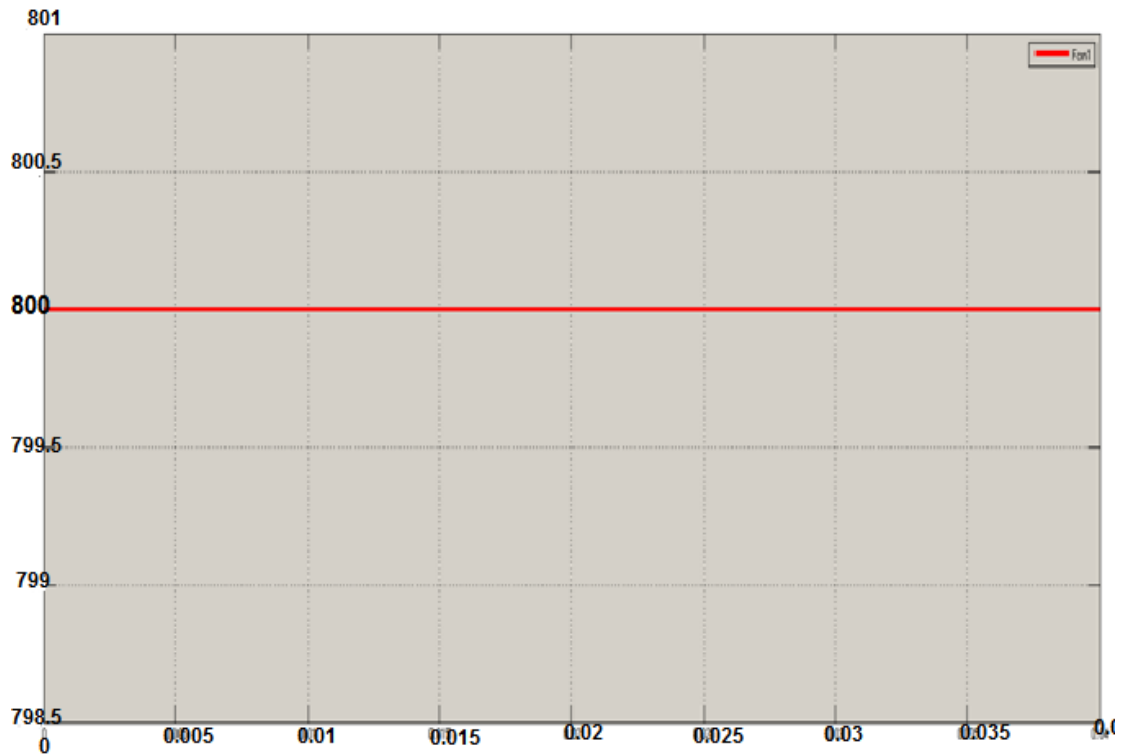


Figure.4.6 Tension efficace mesurée à la sortie du générateur

Chapitre 4 Optimisation et simulation

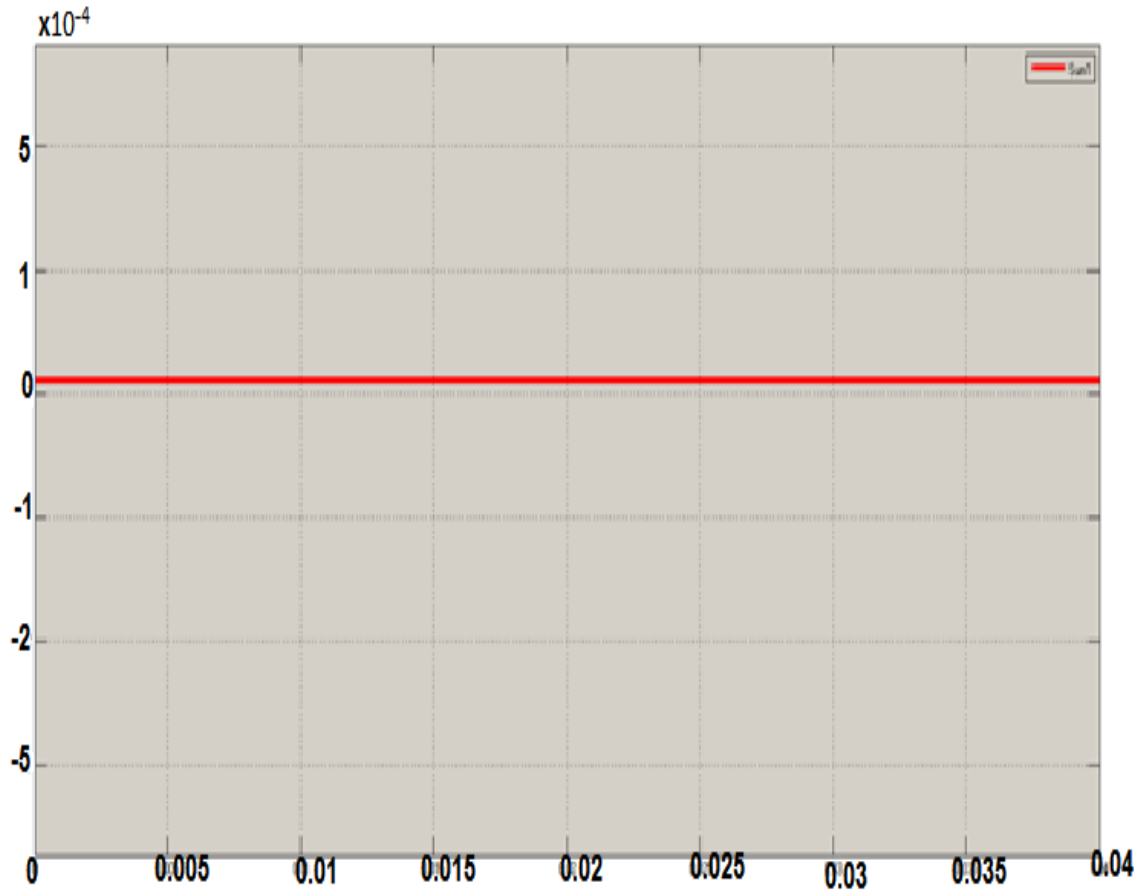


Figure.4.7 L'écart entre la consigne et la tension de sortie du générateur

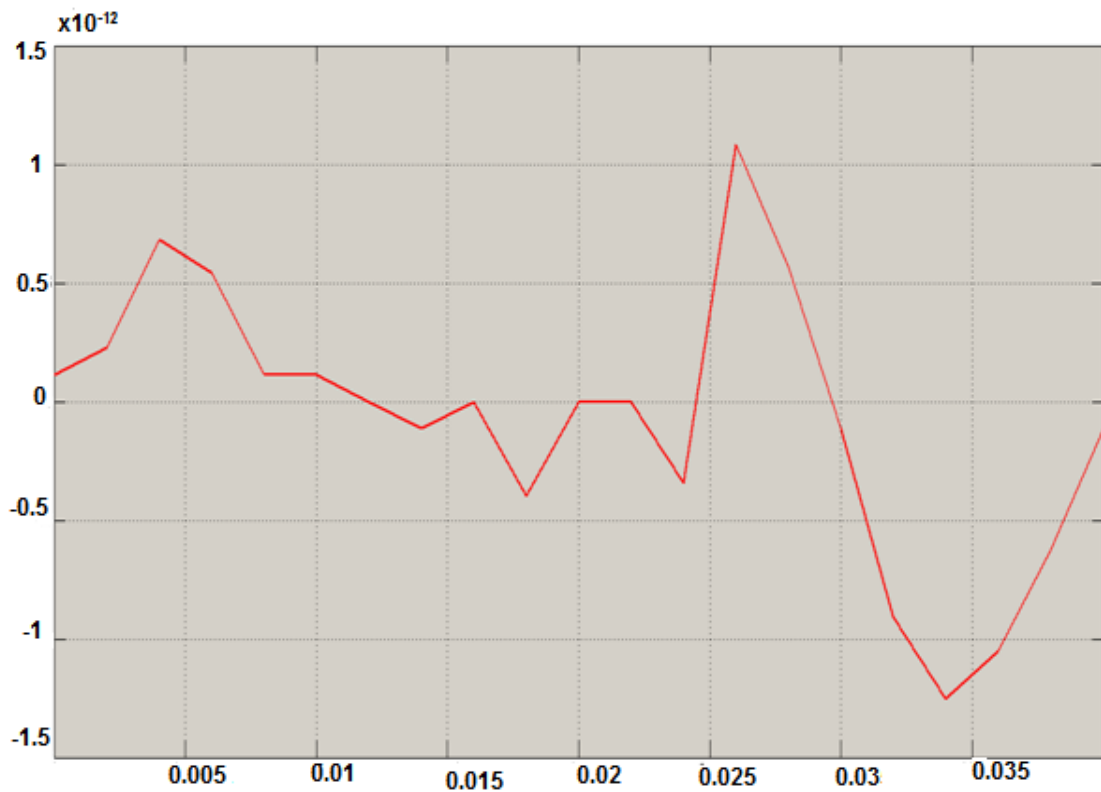


Figure.4.8 Somme des trois tensions de sortie

Chapitre 4 Optimisation et simulation

La tension de sortie suit parfaitement la tension de référence avec une erreur minimale grâce aux paramètres optimisés (K_i, K_p et K_d). Le système est équilibré car la somme des trois tensions est nulle.

4.5 Conclusion

L'algorithme d'essais particuliers a été développé pour optimiser les paramètres du régulateur de tension. Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants.

Bibliographie

- [1] Michel collectif – Louis Le maitre : ‘Centrale thermique’, Presse Universitaire e France,1970 .

- [2] General Electric international, ‘Cycle combiné 30 question’

- [3] General Electric International, ‘Alternateur 450H Cycle Combinée de Hadjret Ennous’, Mars 2008

- [4] Paul C. Krause , Oleg Scott D.Sudhoff : ‘Analysis of electric machinery and drive systems second edition’, Wiley Interscience 2002.

- [5] J.Chatelain : ‘Machine électriques Tome2’,Dunod,1983.

- [6] Dr. B.Kalyan Kumar : ‘Power System Stability and Control’, indian institute of technologu Madras Chennai India

- [7] Jacque LESENNE, Francis NOTLET, Guy Segulier : ‘Introduction à l’électrotechnique approfondie’, ERREUR PERIMES Technique et documentation, Janvier 1981.

- [8] P.Kundur : 'Power System Stability and Control',Electrical Power Researche institute, 1994.
- [9] Patrick Provost : 'Instrumentation et régulation en 30 fiches 2^e édition', DUNOD.
- [10] Sapna Bhati et Dhiraj Nitnawwre : 'Genetic Optimization Tuning of AVR system', IJSET,Volume 3 pg:120-124,
- [11] Martinez Gonzalo, 'The generalized PSO : A new door to PSO evolution', 2008
- [12] Thomas Weise : 'Global Optimization Algorithms, theory and application',2008
- [13] Nicholas Amelon : 'contribution à la modélisation dynamique des alternateurs en vue de la simulation des réseaux embarqués ou ilôtés ',2010
- [14] BARDADI BENDAHA MANSOUR : 'Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel',2015
- [15] Lamy Abdeldjilali : 'MODELISATION DYNAMIQUE ET COMMANDE DES ALTERNATEURS COUPLÉS DANS UN RESEAU ELECTRIQUE EMBARQUE', 2011
- [16] Rachid Abdessamed ; 'MODELISATION ET SIMILATION DES MACHINES ELECTRIQUES', Edition ellipses, 2011

- [17] D.G. Luenberger, 'Linear and non linear programming', Addison Wesley, 1989.
- [18] M.S. Bazaraa, H.D. Sherali et C.M. Shetty, 'Non linear programming theory and algorithms' John Wiley&Sons inc, 1993
- [19] M. Minoux, 'Programmation Mathématique', Théorie et algorithmes. Edition Dunod, Paris 1983.
- [20] K.A. De Jong ' Are genetic algorithms function optimizers?' in Parallel Problem Solving from Nature2. Amsterdam, The Netherland : Elsevier, pp 3-13, 1992
- [21] J. Kennedy, R.C. Eberhart 'particle swarm optimization', IEEE International conference on neural networks, perth, Australia,1995.