



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Batna 2
Mostefa BEN BOULAID

Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

En Electrotechnique

Présentée par :

SMAIL HASSEN

*(Ingénieur, Magister en Electrotechnique,
Maître Assistant à l'Université de Batna 2)*

**Contribution à la Régulation de Tension
d'un Alternateur de Grande Puissance**

Soutenu publiquement le :06/07/2020

devant le Jury composé de:

Dr. M.BOUHARKAT	Professeur	Université de Batna 2	Président
Dr. C.FETHA	Professeur	Université de Batna2	Rapporteur
Dr. T.BAHI	Professeur	Université d'Annaba	Co-Rapporteur
Dr. K. BEDOUD	Maître de conférences (A)	CRTI, Annaba	Examineur
Dr. J. RAHEM	Professeur	Université d'Oum-Bouaghi	Examineur
Dr. S. BENAGOUNE	Professeur	Université de Batna 2	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au Département d'Electrotechnique, faculté de tonologie, de l'Université de Batna 2, sous la direction de mon directeur de thèse le Pr. FETHA Cherif, professeur de l'Université de Batna 2 et mon Co-directeur le Pr. BAHY Tahar, professeur de l'Université Badji Mokhtar Annaba. Je tiens aussi à vivement remercier Dr. SMAIL Mostafa Kamel enseignant et chercheur au sein de l'IPSA pour son aide et sa remarquable collaboration pour la préparation de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse, Pr. FETHA Cherif, pour son soutien, les conseils et vifs informations. Il a grandement contribué à l'amélioration de la qualité de ce travail, comme je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon Co-encadreur Pr. BAHY Tahar, pour ses précieuses orientations qui m'ont été d'un apport considérable pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer également ma reconnaissance au Dr. SMAIL Mostafa Kamel pour avoir participé vivement au suivi de ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur BOUHARKAT Malek Professeur à l'Université de Batna 2 pour avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Je voudrais également remercier tous les membres du jury dont les noms suivent d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail:

Dr. D. RAHEM	Professeur, Université d'Oum-Bouaghi
Dr. S. BENAGOUNE	Professeur, Université de Batna 2
Dr. K. BEDOUD	Maître de conférences (A) CRTI, Annaba

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur ABDELHADI Bachir, professeur à l'Université de Batna 2 d'avoir également contribué à ce travail.

Je tiens aussi à remercier les Professeurs BENAGGOUNE Said, NACERI Farid, DRID Said, et Dr BELAMOUDI Azzedine de l'Université de Batna 2 pour leurs encouragements.

DEDICACE

Je dédie ce travail de recherche

A mon cher cousin MOSTAFA.

À mes parents la source de ma vie.

À mes frères et ma sœur ASMA.

À ma famille, mon épouse qui m'a épaulé et encouragé afin de terminer ce travail ainsi qu'à mes deux anges LOUJINE et ANAÏS.

À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail, à tous ceux que j'ai omis de citer.

Résumé

La génératrice synchrone à trois étages est très utilisée pour un fonctionnement à vitesse variable dans le domaine de l'aéronautique, des grandes centrales électriques et les groupes électrogènes et ceci grâce à l'absence des balais, à sa robustesse et à la présence de tension induite au démarrage de la machine. Le but de la commande est de maintenir une tension d'amplitude constante aux bornes de la charge en contrôlant le courant d'excitation. Dans ce but, une nouvelle structure de régulateur PID a été développée. Elle est basée sur l'optimisation des paramètres du régulateur à dérivées proportionnelles intégrales (PID) par la méthode PSO (Particle Swarm Optimization). De nombreux tests de robustesse ont été effectués en tenant en compte des variations de paramètres, ainsi que la connexion et la déconnexion de la charge à des vitesses faibles et élevées.

Mots clés

Optimisation; PID; PSO; Vitesse variable; Contrôle de, Générateur synchrone avec exciteur sans balais.

Summary:

The three-stage synchronous machine with variable speed generator mode is widely used in the aeronautical field, the large power stations and the generators for the reasons of absence of the brushes, its robustness and the presence of tension induced at the starting of the machine, the purpose of the control in generator mode is to maintain a constant amplitude at the level of the load and this by controlling the excitation current of the exciter, for this there a new structure of PID regulator has been developed based on the optimization PID (Particle Swarm Optimization) parameters, Many robustness tests are carried out by considering the parameters variations as well as the perturbation connection and disconnection of the load at low and high speeds.

Keywords

Optimization; PID; PSO; Variable Speed; Voltage amplitude control; Synchronous Generator with Brushless Exciter.

ملخص

تستخدم الآلة المتزامنة ثلاثية المراحل ذات السرعة المتغيرة على نطاق واسع في مجال الطيران ومحطات توليد الطاقة الكهربائية ذات الاستطاعة الكبيرة وتم اختيارها لعدة أسباب منها: غياب المكائن، فعاليتها ووجود توتر ناتج في بداية عمل الآلة. الهدف من التحكم فيها هو الحفاظ على توتر ثابت على مستوى الحمولة وهذا من خلال التحكم في تيار الإثارة، ولهذا تم تطوير منظم جديد PID يعتمد على تحسين قيم إعدادات المنظم (التناسبي - التكامل - التفاضلي) باستعمال خوارزمية PSO، وقمنا بإجراء العديد من اختبارات المتانة مع مراعاة تغيير في قيم إعدادات الآلة، فصل و وصل الحمولة، وتغير السرعة من منخفضة إلى عالية.

الكلمات المفتاحية:

تحسين PSO ؛ (PID سرب الجسيمات الأمثل) ؛ السرعة متغيرة؛ التحكم في جهد مولد متزامن بدون مكائن.

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Dedicace</i>	<i>III</i>
<i>Sommaire</i>	<i>V</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>VIII</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>X</i>
<i>Notations et symboles</i>	<i>X</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

<i>Contexte général de l'étude</i>	<i>2</i>
<i>Formulation du problème</i>	<i>4</i>
<i>Plan de la thèse</i>	<i>6</i>

Chapitre I

ETAT DE L'ART SUR LES ALTERNATEURS SYNCHRONES A VITESSES CONSTANTE ET VARIABLE

<i>I.1 Introduction</i>	<i>8</i>
<i>I.2. Différents modes d'entraînements des alternateurs</i>	<i>9</i>
<i>I.2.1 Alternateur à vitesse d'entraînement constante</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2 Alternateur à vitesse d'entraînement variable</i>	<i>9</i>
<i>I.3 Systèmes d'excitation</i>	<i>12</i>
<i>I.3.1 Rôle d'un système d'excitation</i>	<i>12</i>
<i>I.3.2 Différents types de systèmes d'excitation</i>	<i>14</i>
<i>I.3.2.1 Système d'excitation à courant continu</i>	<i>14</i>
<i>I.3.2.2 Système d'excitation statique</i>	<i>15</i>
<i>I.3.2.3 Systèmes d'excitation à courant alternatif</i>	<i>16</i>
<i>I.4 Conclusion</i>	<i>20</i>

Chapitre II

MODELISATION DE L'ALTERNATEUR A TROIS ETAGES EN VUE DE SA COMMANDE

<i>II.1 Introduction</i>	<i>22</i>
<i>II.2 Prestation du générateur MS3E</i>	<i>22</i>
<i>II.3 Schéma fonctionnel du MS3E</i>	<i>24</i>

II.3.1 Modélisation et schéma fonctionnel de l'alternateur principal	24
II.3.2 Modélisation et schéma fonctionnel de l'excitatrice et le redresseur	27
II.3.3 Modélisation et schéma fonctionnel de la MSAP	30
II.4 Conclusion	34

Chapitre III

OPTIMISATION DES PARAMETRES DES REGULATEURS PID PAR LA PSO – ETAT DE L'ART

III.1 Introduction	36
III.2 Problème d'optimisation	37
III.2.1 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation	37
III.2.2. L'optimisation dans l'ingénierie	38
III.2.3 Minimisation et maximisation dans l'optimisation	38
III.2.3.1 Optimum global et local	39
III.2.3.2 La meilleure solution	39
III.3 Les méthodes d'optimisation - état de l'art	40
III.3.1 Problèmes d'optimisation contraints	40
III.3.2 Problèmes d'optimisation non contraints	41
III.3.3 Efficacité d'une méthode d'optimisation	44
III.3.4 Opérateurs de recherche fondamentaux	45
III.4 Optimisation par PSO	45
III.4.1 Description algorithmique	46
III.4.2 Valeurs des paramètres φ_1 et φ_2	49
III.4.3 Poids inertiels	49
III.4.4 Nombre de particules	50
III.5 Optimisation des paramètres du contrôleur PID	50
III.5.1 Formulation du problème d'optimisation	50
III.5.2 Modélisation des essaims de particules	50
III.6 Conclusion	53

Chapitre IV

COMMANDE ROBUSTE BASEE SUR L'APPROCHE DE L'OPTIMISATION DES PARAMETRES DES REGULATEURS

IV.1 Introduction	55
IV.2 Description de la méthode de commande	55

<i>IV.3 Présentation du problème en boucle ouverte.....</i>	<i>56</i>
<i>IV.4 Ajustage des paramètres de régulateurs PID par la méthode Ziegler Nichols.....</i>	<i>60</i>
<i>IV.4.1 Méthode directe.....</i>	<i>60</i>
<i>IV.4.2 Méthode de superposition</i>	<i>62</i>
<i>IV.5 Résultats de Simulation et Discussion</i>	<i>64</i>
<i>IV.6 Etude de robustesse</i>	<i>68</i>
<i>IV.7 Conclusion</i>	<i>70</i>
CONCLUSION GENERALE	
<i>Bilan du travail.....</i>	<i>72</i>
<i>Contribution et résultats.....</i>	<i>73</i>
<i>Perspectives</i>	<i>74</i>
<i>Références bibliographiques</i>	<i>76</i>
<i>Annexes A</i>	<i>85</i>
<i>Annexe B.....</i>	<i>87</i>

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Etat de l'art sur les alternateurs synchrones à vitesse constante et variable

Figure (I.1):Diagramme de consommation spécifique d'un moteur diesel	11
Figure (I.2):Structure d'un groupe électrogène à vitesse variable	12
Figure (I.3):Système d'excitation de type DC	15
Figure (I.4):Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension	16
Figure (I.5):Excitation type AC avec redresseur commandé	17
Figure (I.6):Système d'excitation de type Brushless	18
Figure (I.7):Vue physique d'un emplacement d'un alternateur à trois étages sur un turbo réacteur.	19

Chapitre II

Modélisation de l'alternateur à trois étages en vue de sa commande à vitesse variable

Figure (II.1):Structure du générateur synchrone à trois étages	23
Figure (II.2):Schéma fonctionnel de l'alternateur principal alimentant une charge inductive	24
Figure (II.3): Convection des paramètres DC vers AC de l'Excitatrice à travers les diodes tournantes	25
Figure (II.4):Schéma fonctionnel de MSAP alimentant une charge inductive	27
Figure (II.5):Structure de connexion de l'excitatrice et les diodes tournantes	28
Figure (II.6):Conversion des paramètres DC vers AC de l'excitatrice à travers les diodes tournantes	29
Figure (II.7):Structure de la machine synchrone à aimant permanent	31
Figure (II.8):Représentation de la transformation de Park pour MSAP	31
Figure (II.9):Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)	32
Figure (II.10):Schéma fonctionnel de la MSAP alimentant une charge inductive	33

Chapitre III

Optimisation des paramètres des régulateurs PID par la PSO état de l'art

Figure (III.1) : Représentation du minimum et du maximum local et global d'une fonction	39
Figure (III.2): Méthodes d'optimisation déterministes	42
Figure (III.3): Méthodes d'optimisation stochastiques	44
Figure (III.4) : Mise à jour d'une particule avec l'algorithme PSO	47

Chapitre IV

Commande robuste basée sur l'approche de l'optimisation des paramètres des régulateurs PID par la PSO

Figure (IV.1): Schéma de commande de générateur synchrone à excitation sans balais utilisant un contrôleur PID-PSO	59
Figure (IV.2): Variation de la tension de l'alternateur principal pour une charge inductive: $\cos\varphi = 0.8$ en utilisant la méthode de Ziegler Nichols	61
Figure (IV.3): Zoom de la figure (IV.2) entre 0 et 0,5 s.	61
Figure (IV.4): Schéma de commande de machine synchrone à aimant permanent	62
Figure (IV.5) Schéma de commande de l'excitatrice de l'alternateur principal	63
Figure (IV.6) Variation de la tension de l'alternateur principal pour une charge inductive: $\cos\varphi = 0.8$ en utilisant la méthode de Ziegler Nichols superposition	63
Figure (IV.7): Variation de la tension de l'alternateur principal avec une charge inductive $\cos\varphi = 0.8$	66
Figure (IV.8): Variation de la vitesse d'entraînement du générateur synchrone à excitation sans balais	68
Figure (IV.9): Test de robustes pour le démarrage à faible vitesse de 100 rad/s	69
Figure (IV.10): Test de robustesse pour une variation de la résistance du stator (R_s) augmentation de 50% de R_s	69
Figure (IV.11): Test de robustesse pour une variation de la résistance du stator (R_r) augmentation de 50% de R_r	70

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre IV

Commande robuste basée sur l'approche de l'optimisation des paramètres des régulateurs PID par la PSO

Tableau(IV.1): Ziegler-Nichols pour les paramètres de réglage en boucle ouverte	61
Tableau (IV.2): Les paramètres de PSO utilisés en simulation	65

NOTATIONS ET SYMBOLES

Abréviations

MSAP	: Machine Synchrone à Aimants Permanents
MS3E	: Machine synchrone à trois étages
PSO	: Particle Swarm Optimization
GA	:Algorithmes génétiques
$[P(\theta)]$	: Matrice Park
$[P(\theta)]^{-1}$	: Park matrice inverse
S	: Transformée de Laplace
PID	:Proportional, integral, derive
AC	:Courant alternatif
DC	: Courant continu
BF	: Boucle ouverte
BO	: Boucle fermée

Repères

a,b,c	: Axes liés aux enroulements triphasés
d,q	: Axes référentiels de Park
α,β	: Axes référentiels statoriques
O	: Axe homopolaire

Indices des grandeurs

s	: Indice du stator.
r	: Indice du rotor.
d,q	: Indices des composantes orthogonales directe et en quadrature (Park)
réf	: Indice indiquant la référence (la consigne)
eff	: Indice de la valeur efficace.
ch	: Indice de la charge.
t	: Indice indiquant la tension totale
f	: Indice d'excitation.
exc	: Excitatrice.
msap	: Machine Synchrone à Aimants Permanent

Paramètres de modélisation des machines

q	: Nombre de phases.
$Z(\Omega)$	: Impédance.
$e(V)$	: Force électromotrice
$T(\text{Sec})$	: Temps
$V(V)$	: Tension
$I(A)$	: Courant
$P(W)$	: Puissance
$\Phi(\text{Wb})$	: Flux
$R_s(\Omega)$	: Résistance statorique
$R_r(\Omega)$	: Résistance rotorique
$L_s(H)$	: Inductance cyclique propre statorique
$L_r(H)$	: Inductance cyclique propre rotorique
$M(H)$	: Inductance cyclique mutuelle stator-rotor
$fem(V)$	: Force électromotrice

Grandeurs mécaniques

$\theta(\text{rd})$	: Position absolue du rotor
$\delta(\text{rd})$	: Angle de charge
$\Omega(\text{rd/sec})$	: Vitesse de rotation mécanique
$\omega_s(\text{rd/sec})$	: Pulsation des courants statoriques
$\omega_r(\text{rd/sec})$	: Pulsation des courants rotoriques
P	: Nombre de paires de pôles.
$C_e(\text{N.m})$	: Couple électromagnétique
$C_r(\text{N.m})$	: Couple résistant
$J(\text{N.m})$	: Inertie mécanique

Grandeurs magnétiques

$\Phi_{\text{sabc}}(\text{Wb})$	: Vecteur flux statorique
$\Phi_{\text{sd}}(\text{Wb})$	: Flux statorique sur l'axe d.
$\Phi_{\text{sq}}(\text{Wb})$	: Flux statorique sur l'axe q.
$\Phi_{\text{s}\alpha}(\text{Wb})$	: Flux statorique sur l'axe α .
$\Phi_{\text{s}\beta}(\text{Wb})$	: Flux statorique sur l'axe β .
$\Phi_{\text{f}}(\text{Wb})$	: Flux d'un aimant permanent de la machine

Paramètres d'optimisation des régulateurs

K_P	: Action proportionnelle
K_i	: Action intégrale
K_d	: Action dérivée
F	: Fonction objective
O_{sh}	: Dépassement maximal du changement de tension de l'alternateur principal
$t_{\text{sh}}(\text{Sec})$	: Temps d'établissement du changement de la tension
$\max_dv$	: Dérivée maximale de tension de l'alternateur principal

Paramètres de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules

OEP	: Optimisation par Essaim Particulaire
PSO	: Particle Swarm Optimization
$F(x)$	: Fonction à optimiser
X_i	: Emplacement de la particule i
V_i	: Vitesse de déplacement d'une particule i
P_i	: Position où une particule a obtenu sa meilleure qualité
P_g	: Position de la meilleure qualité obtenue par l'ensemble des particules
t	: Itérations
$G(\bar{P}_g)$	: Fonction de la meilleure valeur de qualité
$G(\bar{x}_i)$	: Qualité de la particule i en fonction de son vecteur de position
φ_1 et φ_2	: Paramètres d'ajustement
$w(t)$	: Poids d'inertie
F	: Fonction objective
$pbest_i$	: Valeur de fitness de la meilleure position d'une particule
$gbest_i$	: Valeur de fitness de la meilleure position globale
$G(S)$	: Fonction de transfert du contrôleur PID

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte général de l'étude

La présentation du contexte industriel et scientifique dans ce manuscrit s'est basée sur des travaux de recherches effectués. Afin d'établir le tout, on va se focaliser sur les travaux réalisés, recherches scientifiques inscrivant les travaux de recherche effectués dans un passé plus ou moins proche, et axées sur le sujet traité, ce qui permettra de bien comprendre en profondeur l'étude de la présente thèse.

Les besoins mondiaux en énergie électrique, et leurs préoccupations environnantes, sont la cause principale de cette étude. Il va sans dire que la demande électrique est sans cesse croissante, c'est la raison pour laquelle, les alternateurs électriques avec une meilleure fiabilité et efficacité énergétique s'imposent[1].

Généralement les besoins d'énergie de la planète sont assurés, par l'utilisation des générateurs électriques dans leurs différents types. Les applications sont citées par la suite. Chaque caractéristiques techniques, sont déterminées par les machines synchrones et asynchrones, ce qui peut mener à des applications spécifiques. Les caractéristiques et les défauts de ces machines les rendent efficaces dans des modes de fonctionnement bien précis. Dans ce cas même, industriel et technique, constitue, la problématique principale de la thèse, étape par étape [2][3].

La machine synchrone à trois étages à diode tournante est très utiles dans plusieurs domaines, sa structure et ces nombreux avantages seront présentés dans le chapitre I[4-8].

La machine synchrone à trois étages sans balais, fonctionnant en mode générateur est largement utilisée dans plusieurs domaines pour des raisons d'autonomie et de robustesse, telles que les centrales électriques, groupes électrogènes, aéronautique etc. Sa description sera présentée dans la suite de la thèse. Elle se distingue par les avantages suivants:

- Aucun entretien;
- Pas de vérification ou remplacement de balais;
- Elimination des balais et du collecteur tournant dans le système d'excitation offre une grande fiabilité telle que l'émission des poussières de carbone ;
- Meilleur isolement de l'alternateur principal ;

- Augmentation de la durée de vie de l'alternateur ;
- Auto excitation de l'alternateur, présence de tension au démarrage.
 - La machine à aimant permanent donne l'autonomie totale de la machine, elle ne nécessite pas une source auxiliaire pour l'alimentation de l'excitation,[9].

Le contrôle de la tension de l'alternateur à trois étages destiné à l'amélioration des performances tel que le temps de réponse, la stabilité, qui doivent être pris en considération lors de la modélisation, [10-14].

Le correcteur PID est la technique la plus utilisée dans la commande des processus industriels. Les raisons majeures de sa large acceptation en industrie sont dues à sa capacité de commander la majorité des processus, à ses actions qui sont bien comprises et à son implémentation qui est relativement simple.

Plusieurs techniques existent pour le réglage des paramètres du correcteur PID, un travail de recherche continu est encore en cours pour proposer de nouvelles approches de réglage. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système précis et insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques.

Avec le développement des systèmes de production de puissance, ces méthodes seront moins efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non-linéaires. Chose qui pousse à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID. On peut citer la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques (GA) et l'optimisation par l'essaim particulaire (PSO). Ce dernier est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème en question [15].

Dans ce travail, l'optimisation par PSO fondée sur le modèle du système à commander est appliquée pour déterminer les paramètres optimaux des régulateurs PID.

Dans ce but bien précis, l'état d'avancement des recherches dans ce domaine du contrôle des alternateurs, des études sur des machines asynchrones à cage, synchrones et à aimants permanents, des méthodes de commande ont été développées, ce qui constituent une piste importante pour la commande des alternateurs à diodes tournantes.

Formulation du problème

L'alternateur synchrone à trois étages est largement utilisé dans plusieurs domaines tels que les centrales électriques à grande puissance, groupes électrogènes et l'aéronautique pour des raisons de robustesse et d'autonomie. Dans notre travail, on ne considère que la variation de la vitesse et celle de la charge comme deux perturbations influençant le système. Pour maintenir l'amplitude de la tension aux bornes de la charge constante, on doit contrôler la tension d'excitation de l'excitatrice tout en supposant que le moteur d'entraînement est une source de vitesse et l'alternateur fonctionne à l'état autonome sans connexion à un réseau électrique.

Pour cibler les problèmes de la commande, un programme de simulation en boucle ouverte a été réalisé. On remarque que l'écart entre la tension nominale de l'alternateur principal et la tension de simulation en boucle ouverte est très important soit à vide ou en charge surtout pour les grandes vitesses. Cet écart de la tension cause de nombreuses difficultés pour contrôler la tension de sortie de la machine. Pour cette raison, des travaux ont été réalisés dans le but d'assurer une commande performante. Dans ce contexte, on va proposer un contrôle fiable et une implémentation relativement facile.

L'objectif capital des travaux de cette thèse consiste à étudier la conception d'un régulateur de tension PID pour un alternateur à trois étages MS3E dans les cas de faibles et grandes vitesses ainsi que lors de connexion et déconnexion de la charge. Les paramètres du régulateur PID ont été optimisés à l'aide de la méthode PSO.

Les objectifs spécifiques se résument :

- a- Proposer et étudier un modèle mathématique de l'alternateur à trois étages en vue de sa commande pour un fonctionnement à vitesses variable et constante;
- b- Proposer une nouvelle structure de régulateur de tension PID basée sur l'optimisation de ses paramètres par PSO, dans le but d'assurer une meilleure stabilité, rapidité et précision au niveau de la tension de sortie de l'alternateur principal;
- c- Concevoir un programme de simulation sous Matlab-Simlink afin de d'analyser les performances de ce nouveau régulateur.

L'originalité de ces travaux réside dans l'idée proposée qui consiste à développer un régulateur de tension pour l'alternateur à trois étages qui s'adapte aux contraintes de fonctionnement les plus sévères tels que la variation de vitesse et la connexion et la déconnexion de la charge. Un concept innovateur peut être utile dans plusieurs domaines à savoir les centrales électriques, les groupes électrogènes et la production d'énergie embarquée.

Dans cette thèse, il a été proposé la régulation de la tension de l'alternateur à trois étages fonctionnant à vitesses variable et constante. Ce thème a fait l'objet de plusieurs travaux. Notre contribution dans ce domaine a fait apparaître la simplicité du régulateur élaboré et les performances qui en résultent, tels que le temps de réponse, la fiabilité, la stabilité, et la facilité de l'implantation pratique, qui constituent une contribution originale de ce travail.

Elaboration d'une nouvelle technique de contrôle basée sur l'algorithme PSO suit les étapes suivantes permettant d'atteindre l'objectif de ce travail:

Revue de littérature :

Un état de l'art sur les systèmes d'excitation des génératrices synchrones sera présenté ainsi que les différents types de systèmes d'excitations avec leurs utilisations, leurs fonctionnements et le rôle important qu'ils jouent dans un alternateur à trois étages seront alors abordés,.

Modélisation des sous-ensembles :

Un modèle mathématique de la machine en vue de sa commande à vitesses variable et constante est élaboré pour chaque bloc. Et enfin, la modélisation du système d'excitation, qui présente la partie importante dans notre travail, avant de faire l'assemblage et la mise en commun des différents modèles, dans un seul modèle global.

Cela permettra d'effectuer des essais et des simulations sur l'ensemble du système, ce qui nous permet la localisation des problèmes de la commande et la compatibilité entre différentes étages de la machine telles que la tension d'excitation, la vitesse et surtout la tension d'amorçage de l'ensemble.

Un autre plan du contexte scientifique est également exposé comme un modèle mathématique de la machine proche à la réalité en prenant en considération les contraintes de la machine susceptibles d'améliorer la qualité de la commande.

Régulation et contrôle des grandeurs de sortie :

Le contrôle de la tension de l'alternateur à trois étages destinés pour plusieurs

applications tels les centrales électriques, les groupes électrogènes et la production d'énergie embarquées, doit satisfaire à des exigences spécifiques.

En effet, en plus des performances exigées, le temps de réponse, la stabilité seront pris en considération lors de la mise en équations de MS3E.

On va citer une description technique de la commande du système étudié tout en justifiant l'objectif et la nécessité de développer des méthodes efficaces de contrôle basées sur PSO.

Optimisation des paramètres des régulateurs PID-PSO du système d'excitation:

Une méthode d'optimisation appropriée PSO est appliquée, afin de générer les valeurs optimales de chaque paramètre du régulateur du système d'excitation de l'alternateur à trois étages.

La présentation de cette méthode et du critère d'optimisation sera définie. La validation et les résultats obtenus sont présentés dans le dernier chapitre avant d'aboutir à une conclusion générale.

Plan de la thèse

Afin de répondre aux objectifs cités précédemment, la thèse est structurée par une introduction générale soulignant le sujet de recherche avec ses problématiques, les objectifs fixés et la méthodologie pour les atteindre suivie de quatre chapitres.

Le chapitre I est consacré pour la littérature concernant les systèmes d'excitation des génératrices synchrones, les différents types de systèmes d'excitations, leurs utilisations, leurs fonctionnements et le rôle important qu'ils jouent dans MS3E.

Le chapitre II est dédié à l'alternateur synchrone à trois étages son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients, un modèle de la machine en vue de sa commande à vitesses variable et constante. Il comprend aussi un programme élaboré sous Matlab-Simulink dans le but de déterminer ses performances avec précision.

Le chapitre III exposera, dans un premier lieu, un état de l'art des méthodes d'optimisation, leurs importances et leurs applications. Il englobe aussi les avantages et les inconvénients de ces techniques, le choix de la méthode appropriée PSO et enfin la présentation du critère d'optimisation des paramètres PID.

Le chapitre IV est destiné à l'élaboration d'un programme sous Matlab-Simulink. Il permet de déterminer ses performances avec précision et de valider les résultats de simulation, ainsi que les modèles de l'alternateur à trois étages modélisés, un test de robustesse sera effectué.

Chapitre I

ETAT DE L'ART SUR LES ALTERNATEURS
SYNCHRONES A VITESSES CONSTANTE ET
VARIABLE

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LES ALTERNATEURS SYNCHRONES A VITESSES CONSTANTE ET VARIABLE

I.1 Introduction

Un alternateur produit de l'électricité lorsqu'il est entraîné par un moteur thermique ou par une turbine. Leurs poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. Dans plusieurs cas, ils sont des générateurs à courant alternatif et généralement utilisés dans les centrales thermiques ou hydrauliques et dans les groupes électrogènes.

Les forces électromotrices, sont produites par induction, ce qui explique le déplacement relatif de circuit induit par apport d'un circuit inducteur. Un courant continu passe dans les bobines de l'inducteur et aimante les pôles.

Le principe d'induction magnétique est, généralement, expérimenté en déplaçant un aimant permanent dans une bobine. Une tension se crée aux bornes de la bobine. Un alternateur fonctionne selon le principe d'un électroaimant, alimenté par une tension d'excitation et est en rotation à l'intérieur de trois bobines produisant ainsi trois tensions triphasées alternatives décalées de 120° . Ces tensions sont ensuite redressées en une tension continue pour alimenter l'inducteur sous le contrôle d'un régulateur, afin de maintenir la tension de sortie de l'alternateur à une valeur constante.

L'énergie produite par un alternateur est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'électroaimant et à sa puissance, qui elle-même est proportionnelle à la tension d'excitation.

Les alternateurs à grande puissance, ayant un induit fixe et un inducteur mobile, peuvent être sous deux formes : les alternateurs à pôles inducteurs saillants dont, leur vitesse est relativement lente, et sont entraînés par des turbines hydrauliques ou des moteurs à gaz ou diesel; les alternateurs à inducteurs lisses sont accouplés à des turbines à vapeur ou hydrauliques tournant à grande vitesse. Sachant que certains alternateurs de petite puissance ont un inducteur fixe ou un induit mobile, notamment ceux utilisés comme excitateur en bout d'arbre [16][17].

I.2. Différents modes d'entraînements des alternateurs

I.2.1 Alternateur à vitesse d'entraînement constante

L'alternateur est généralement entraîné par un moteur thermique ou une turbine qui tourne à une vitesse constante. L'avantage de cette solution c'est la simplicité et le prix d'énergie au Kilowatt /heure compétitif.

Il présente toutefois certains inconvénients :

- Le volume sonore du moteur d'entraînement est constant quelque soit la puissance demandée car la vitesse est constante, la vitesse d'entraînement est fixée, par un régulateur généralement à une structure mécanique.
- Le niveau d'émissions de la pollution est élevé et le rendement est faible surtout pour une faible demande d'énergie d'après le diagramme de consommation spécifique des machines d'entraînement tel que le moteur diesel ou turbine.
- Une mauvaise qualité de fréquence et de tension, au moment de la variation brusque de la charge, peut créer des problèmes aux bornes des charges sensibles.
- Les alternateurs d'entraînement à vitesse fixe, indépendamment de la charge, provoquent l'usure mécanique des pièces relativement rapide, par conséquent cela augmente le coût de maintenance. Toutefois, les recherches à venir viendront à bout pour régler cet état de fait [18][19].

I.2.2 Alternateur à vitesse d'entraînement variable

Les alternateurs fonctionnant à vitesse variable sont basés sur le couplage des alternateurs fonctionnant à vitesse et puissance variables entraînés par des turbines ou moteurs thermiques, un convertisseur AC/DC/AC alimentant une charge électrique triphasée à fréquence constante et puissance variable.

L'association d'un convertisseur statique à la machine électrique permet de fournir une énergie électrique à une fréquence imposée à partir d'un moteur d'entraînement à vitesse variable de rotation.

Le convertisseur AC/DC/AC permet d'adapter la vitesse de rotation du moteur en fonction de la variation de la charge grâce à un régulateur de tension. C'est-à-dire, le régulateur adapte le régime de moteur d'entraînement par rapport à la charge branchée aux bornes de l'alternateur, c'est le même principe de la boîte vitesse d'un véhicule à chaque fois, le conducteur adapte la vitesse de déplacement au régime de moteur. Cette solution présente plusieurs avantages.

- La commande électronique de la vitesse du moteur d'entraînement est réalisée grâce à un moteur pompe qui contrôle le débit du carburant, garantissant une tolérance de tension et de fréquence de l'alternateur à $\pm 1\%$ des valeurs nominales. Cette grande précision permet d'avoir une très bonne qualité de courant et de faire fonctionner sans risque les appareils les plus sensibles.
- Comme la vitesse de rotation de l'alternateur n'est plus liée à la fréquence du courant, le régime peut s'adapter à la puissance demandée. Lorsque le besoin diminue, la vitesse diminue ainsi tout en diminuant le bruit, la consommation du carburant, et l'usure mécanique des pièces donc une diminution du coût d'entretien.
- Une cartographie de consommation spécifique au type diesel, caractérise le moteur à combustion interne, dont le but est de déterminer la consommation spécifique de carburant de moteur en fonction de la vitesse de rotation et de la puissance fournie.

La consommation spécifique est inversement proportionnelle au rendement du moteur, lorsque la consommation spécifique du moteur est élevée, son rendement en sera faible. La figure (I.1) illustre un diagramme de consommation spécifique identique pour un moteur diesel industriel équipé d'un turbo-compression. On peut distinguer que le rendement maximum est d'environ 60% de sa puissance maximale pour la plus faible vitesse possible.

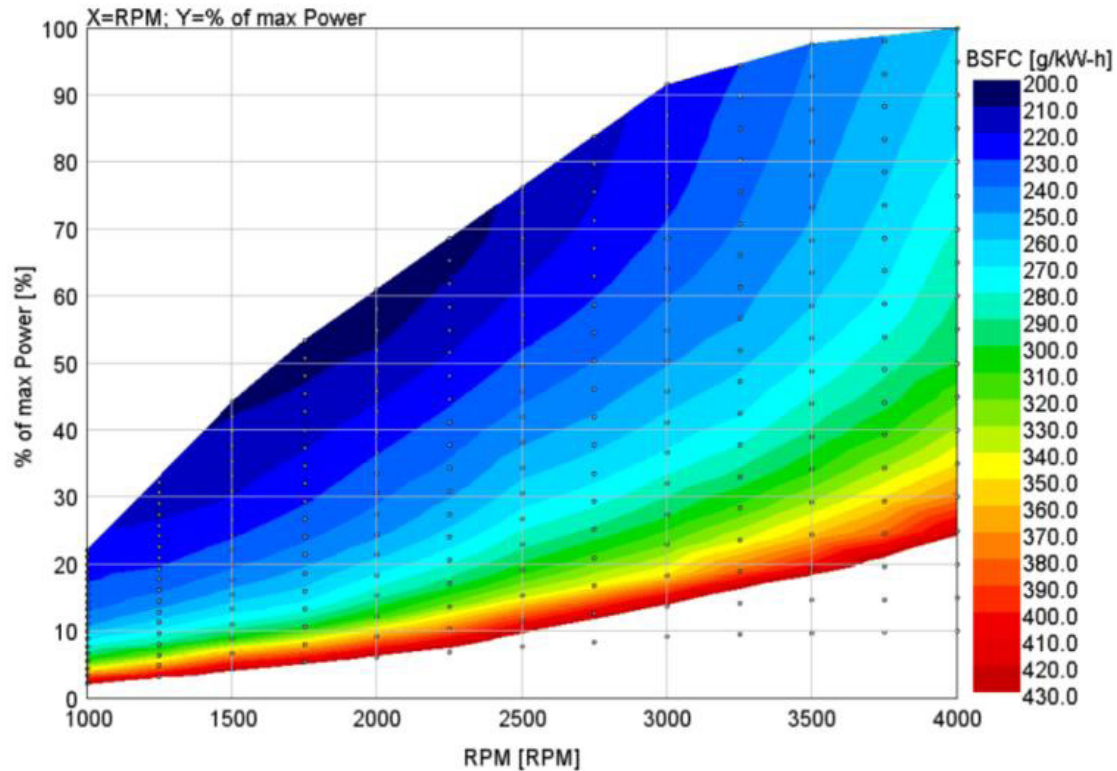
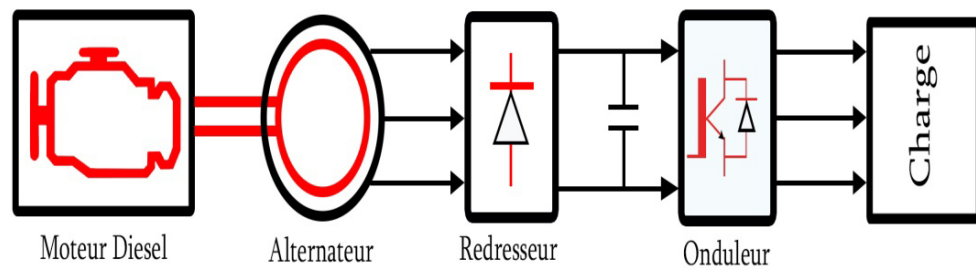


Figure (I.1) : Diagramme de la consommation spécifique d'un moteur diesel [20]

La consommation spécifique est inversement proportionnelle au rendement du moteur, lorsque la consommation spécifique du moteur est élevée, son rendement en sera faible. La figure (I.1) illustre un diagramme de consommation spécifique identique pour un moteur diesel industriel équipé d'un turbo-compression. On peut distinguer que le rendement maximum est d'environ 60% de sa puissance maximale pour la plus faible vitesse possible.

D'une façon générale, pour un moteur industriel, pour une vitesse donnée correspondante au rendement maximal et consommation minimale, la consommation spécifique s'exprimera alors en gramme par kilowatt/heure.

Actuellement, les groupes électrogènes à vitesse variable nommés groupes électrogènes 'inverter' sont très sollicités à cause de leurs nombreux avantages qui ont été cités précédemment, le coût de la partie de l'électronique de puissance investie dans le groupe sera rapidement amorti grâce au rendement élevé de groupe voir figure (I.2) [21-26].



Figure(I.2) : Structure d'un groupe électrogène à vitesse variable

I.3 Systèmes d'excitation

Cette partie consiste à définir le système d'excitation de l'alternateur et les éléments essentiels qui le constituent. Les exigences et les nécessités du fonctionnement des systèmes d'excitations seront aussi étudiées.

Les types de systèmes d'excitations des alternateurs seront par la suite présentés suivant leurs utilisations, le rôle et l'importance, le principe de commande de régulation et de stabilisation dans le but d'assurer la fiabilité de la machine pour une meilleure qualité de tension et fréquence.

Les différents circuits de commande et de protection seront détaillés afin de montrer l'utilité, la nécessité et le fonctionnement de chaque élément du système d'excitation; excitateur, régulateurs, relais de protection etc., [27].

I.3.1 Rôle d'un système d'excitation

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont, principalement, basées sur l'alternateur ainsi que le circuit d'alimentation. La condition de base est que le système d'excitation doit ajuster le courant ou la tension de champ afin d'exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie selon la consigne.

Le système d'excitation assure deux rôles. Le premier est de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone. Le second, assure le contrôle, le maintien de la tension et de la puissance réactive, ainsi que d'autres

fonctions de protection (respect des contraintes de la machine), le tout par l'action de la tension d'excitation.

D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation devrait contribuer au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations telles que les variations de la charge et de la vitesse.

En conclusion, l'amélioration des performances du système d'excitation des alternateurs n'a pas cessé de se développer. Auparavant, les systèmes d'excitation intervenaient manuellement dans la régulation et le maintien constant de la tension et la puissance réactive en sortie des alternateurs.

Au début, le contrôle de la tension alternateur était lent. L'intégration des régulateurs continus dans les systèmes d'excitations dans le début des années 1920, a contribué dans l'évolution de ceux-ci, permettant de résultats meilleurs, et a suscité, par conséquent l'intérêt d'un grand nombre d'industriels. Depuis, le système d'excitation n'a cessé de connaître des évolutions. Ce n'est qu'en 1960, que l'importance et le rôle du système d'excitation qu'ont été élargis en utilisant des signaux de puissance de système à l'aide de stabilisateur de puissance.

Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des perturbations importantes.

Enfin, le rôle du système d'excitation, c'est la régulation de la tension elle-même qui détermine les limites nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice, l'alternateur, et des autres équipements (turbine, réseau, etc...). Les exigences doivent être respectées pour une flexibilité de la commande de la tension, et assurer ainsi la fiabilité des équipements [28].

En général, le système d'excitation est composé de quatre parties:

- **L'excitatrice:** fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor.
- **Le régulateur:** permet de contrôler et stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice;
- **Le capteur de tension:** mesure la tension aux bornes de la machine, qui sera par la suite comparée à la référence (tension désirée aux bornes de la machine);
- **Les limiteurs et les circuits protecteurs:** sont toute une large gamme de

relais de protection qui assurent donc les contraintes de limite du circuit d'excitation et l'induit de l'alternateur ne dépasse pas les paramètres nominaux, tels que la tension et le courant d'excitation.

I.3.2 Différents types de systèmes d'excitation

Les systèmes d'excitations pour les alternateurs synchrones se subdivisent selon la source d'alimentation, en trois types essentiels:

- Source d'excitation à courant continu;
- Source d'excitation à courant alternatif;
- Source d'excitations statiques ou auto excitée.

Dans cette partie, ces différents types d'excitation seront décrits, ultérieurement suivant la forme et la structure générale de chacun, [29][30].

I.3.2.1 Système d'excitation à courant continu

Cette catégorie d'excitation utilise une machine à courant continu comme source de l'excitation, fournissant le courant du rotor de l'alternateur à travers les bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur solidaire à l'arbre de l'alternateur, et parfois soit auto-excitée, soit excitée séparément, la régulation est manuelle. On fixe la position de rhéostat pour une tension de sortie à vide +10% voir figure (I.3).

L'excitation à courant continu est la première utilisée depuis l'année 1920 jusqu'au 1960 où elle a été remplacée par l'excitation de type AC.

Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisé à cause des frottements mécaniques du collecteur et des balais.

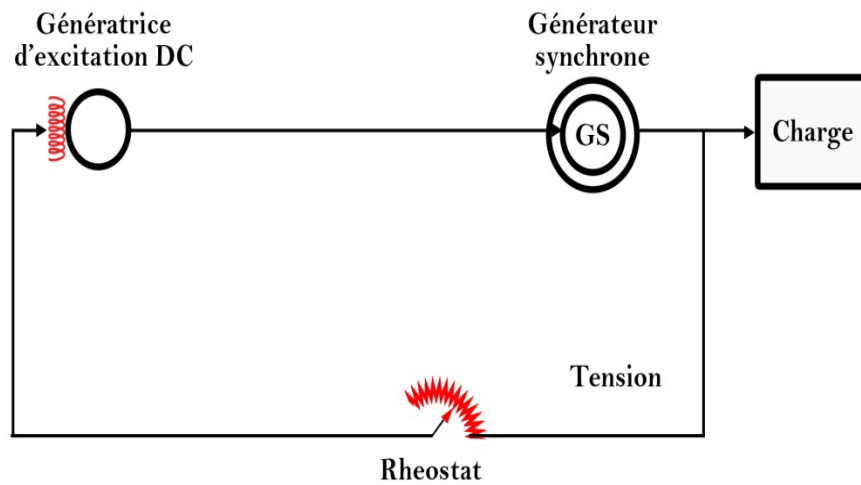


Figure (I.3) : Système d'excitation de type DC

I.3.2.2 Système d'excitation statique

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires utilisant des composants électroniques de puissance. Le redresseur statique fournit la puissance nécessaire à l'excitation de l'alternateur synchrone à travers des bagues collectrices, et celui-ci est alimenté par l'alternateur lui-même à travers un transformateur d'excitation.

Cependant, ce type d'excitation statique se présente sous trois types de structures d'excitations, tels que le redresseur commandé à source de tension, ou le redresseur non commandé à source combinée avec redresseur commandé.

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension illustrée par la figure (I.4) est la plus répandue en pratique, dont voici quelques-unes de ses caractéristiques :

- Pas de partie tournante à part la machine;
- Utilisation d'un autotransformateur alimenté par l'alternateur dont sa sortie est connectée au redresseur commandé qui à son tour alimente l'excitation, Le rôle de l'autotransformateur est de diviser la tension produite par l'alternateur.

Cette technique d'excitation largement utile pour les alternateurs faible et moyenne puissance à cause de son coût et facile à entretenir.

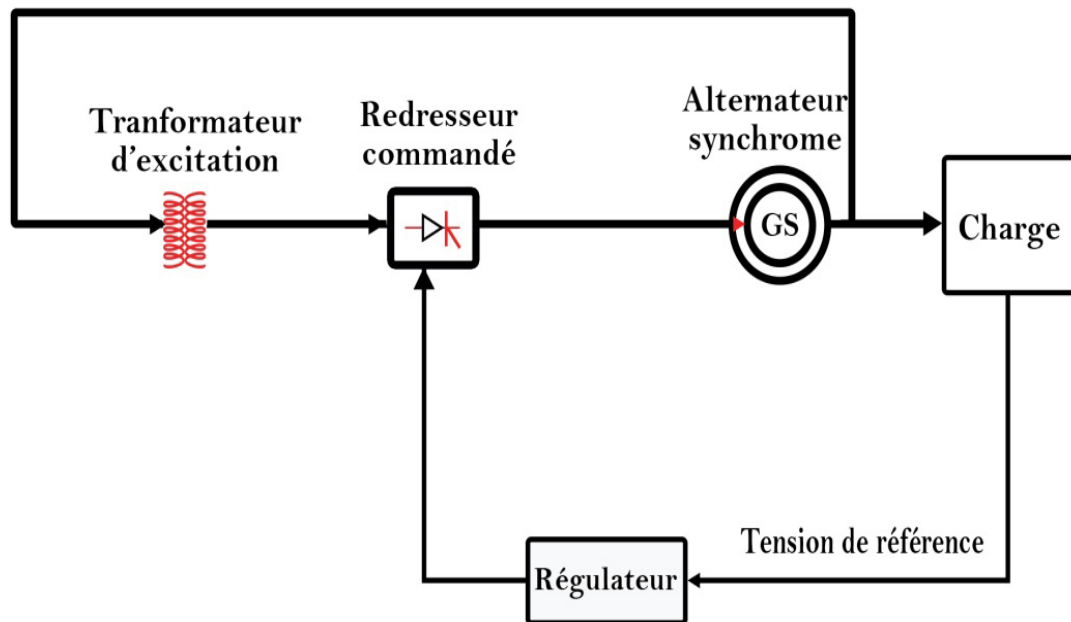


Figure (I.4) : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension

I.3.2.3 Systèmes d'excitation à courant alternatif

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant la machine synchrone, le redresseur utilisé peut aussi être soit commandé ou non. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champs au niveau de l'excitatrice AC.

La figure (I.5) représente l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé, respectivement.

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la machine synchrone.

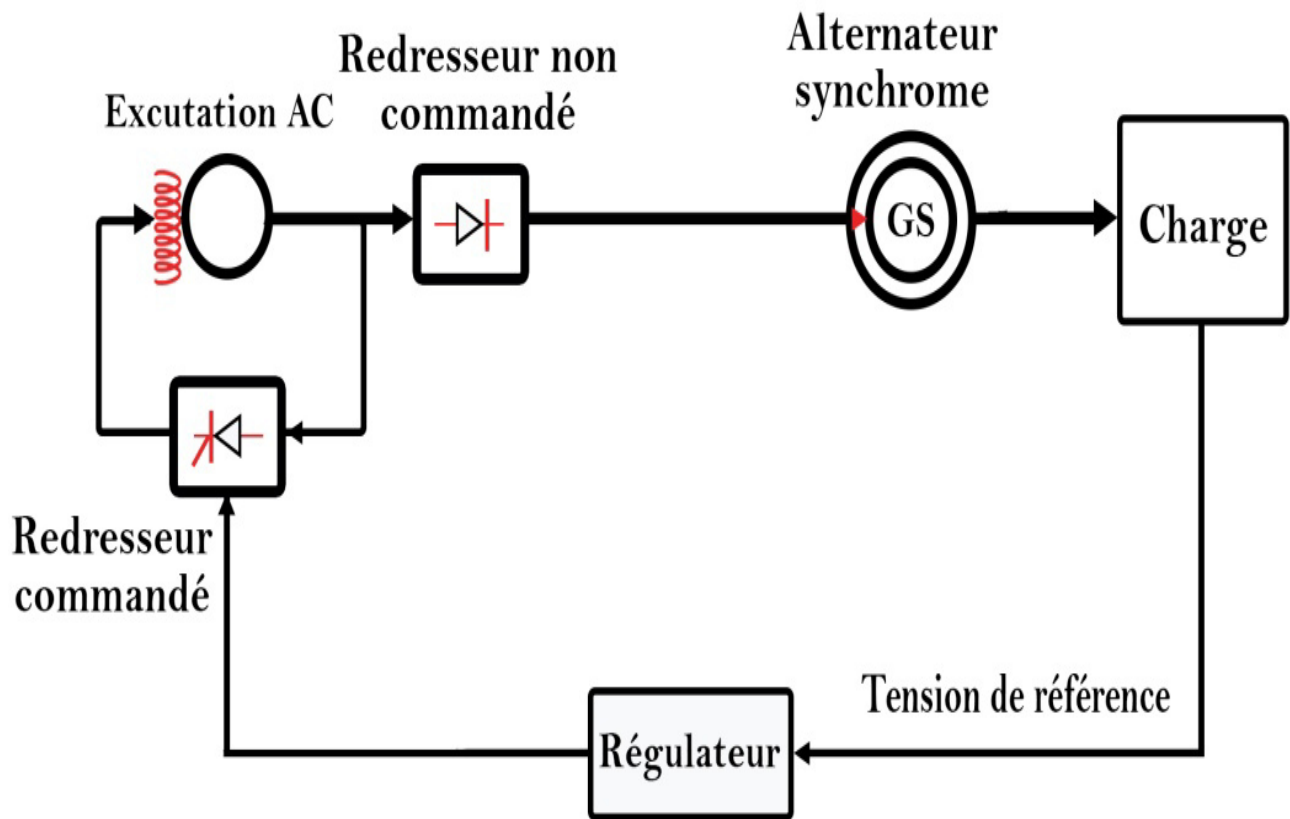


Figure (I.5) : Excitation type AC avec redresseur commandé

La figure (I.6) illustre l'excitation AC de type Brushless où l'on observe la structure tournante composée de rotor de l'excitatrice AC et du redresseur à diodes tournantes. Elles sont calées sur le même arbre et par conséquent tournent à la même vitesse que ceux-ci. Elles ont plusieurs avantages par rapport aux excitatrices statiques à courant continu dont:

La suppression des collecteurs et bagues, implique un alternateur sans entretien, ce qui est exigé par les installations, avec une durée de vie importante et fiabilité remarquable comme a été déjà évoqué, ces avantages ont conduit à leur utilisation dans plusieurs domaines comme la production d'énergie embarquée, centrales électriques et les groupes électrogènes.

Cependant, ces modes d'excitatrices ont aussi certains inconvénients, qui sont le temps de réponse de la tension d'excitation de l'alternateur principal qui est relativement important. Notre contribution sera la réduction du temps de réponse en choisissant une

technique de contrôle adéquate, tout en s'approchant le plus possible de la tension désirée de l'alternateur principal.

Une machine synchrone à aimant permanent est connectée avec ce mode d'excitation ce qui forme un alternateur synchrone à trois étages, MSAP a pour rôle de délivrer une tension primaire nécessaire à l'excitatrice et l'alternateur principal pour magnétiser les diodes tournantes et ceci sans apport de source électrique extérieure [31][32].

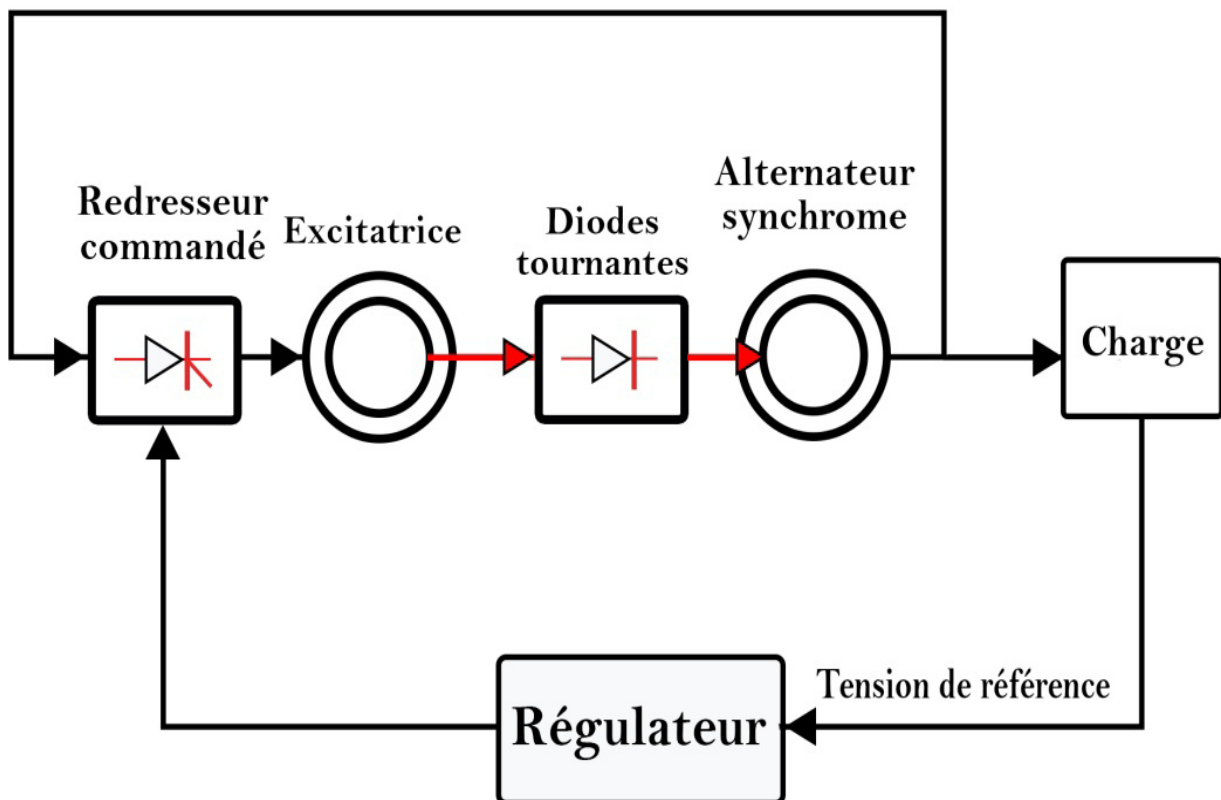
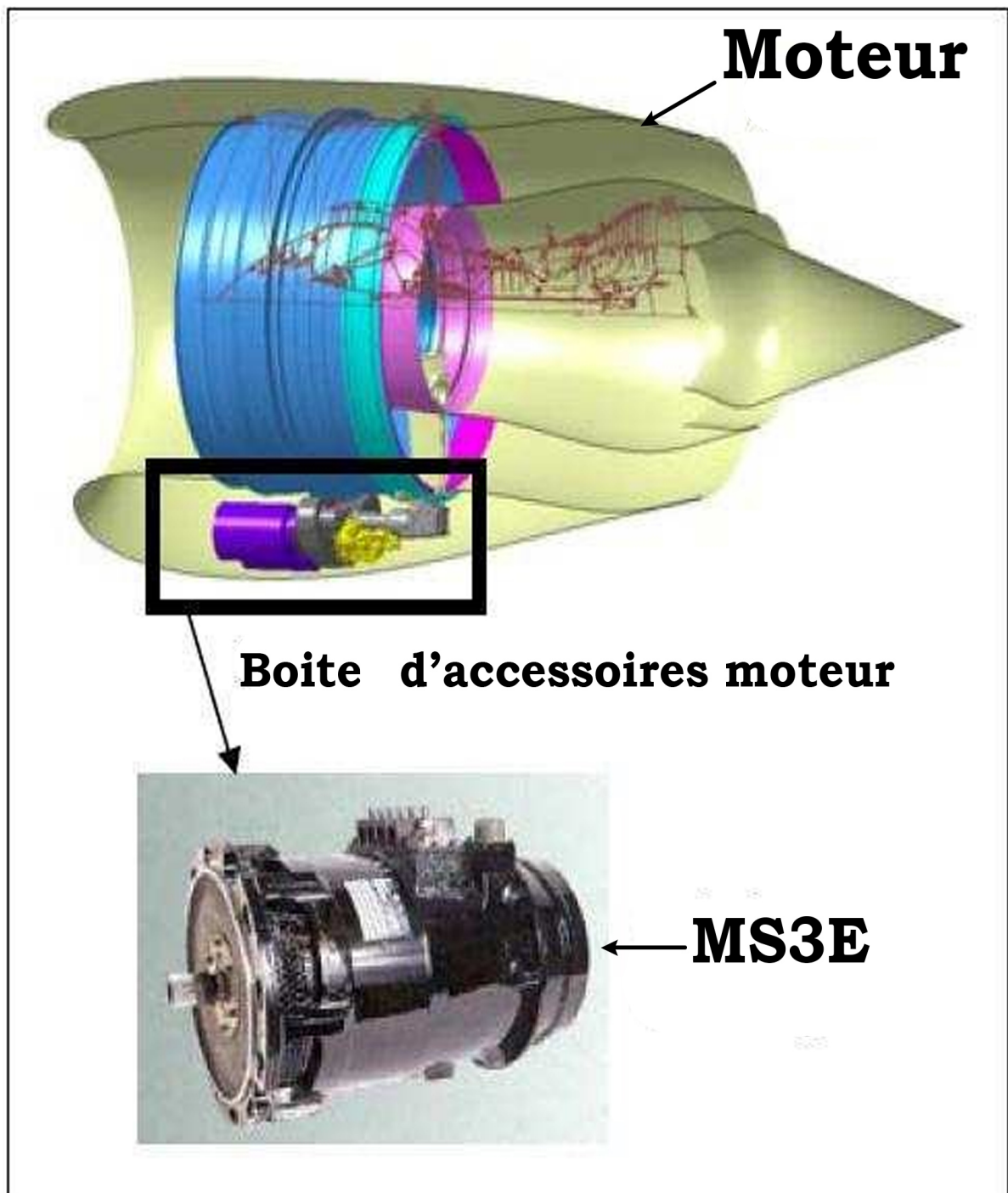


Figure (1.6) : Système d'excitation de type Brushless



Figure(I.7) : Vue physique d'un emplacement d'un alternateur à trois étages sur un turbo réacteur [33]

Grâce à ce mode d'excitation, on a une tension induite juste au démarrage de l'alternateur. On aura aussi une tension induite pour les faibles vitesses.

Ce qui constitue un avantage très important pour l'alternateur à vitesse d'entraînement variable voir figure (I.6). La figure (I.7) représente une application directe de cette machine dans le domaine turboréacteur où l'alternateur est couplé directement avec le moteur d'entraînement.[34]

I.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître la différence entre un entraînement à vitesse variable et constante, les avantages et inconvénients de chaque technique, ainsi que l'importance et le rôle des systèmes d'excitation des alternateurs. Cela, nous a menés à une étape importante dans la modélisation de l'alternateur synchrone à trois étages, ce qui est le sujet du prochain chapitre. On a vu aussi les différents systèmes d'excitation ce qui va nous aider à développer une méthode de contrôle qui s'adapte à l'entraînement à vitesses variable et constante avec un bon niveau de précision et de rapidité pour réagir rapidement en cas de perturbation soit de variation de la charge ou de la vitesse.

Chapitre II

MODELISATION DE L'ALTERNATEUR A TROIS ETAGES EN VUE DE SA COMMANDE A VITESSE VARIABLE

CHAPITRE II

MODELISATION DE L'ALTERNATEUR A TROIS ETAGES EN VUE DE SA COMMANDE A VITESSE VARIABLE

II.1 Introduction

La démarche suivie dans ce chapitre est la suivante : à partir de la problématique présentée dans l'introduction, nous allons modéliser l'alternateur principal après l'excitatrice qui est une machine synchrone inversée pour en finir par la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent et du redresseur.

Ceci a pour objectif l'étude du comportement de MS3E dans le cas des variations de la charge et de la vitesse. Ces variations sont considérées comme des perturbations du système sur la tension de sortie de l'alternateur principal constituant le paramètre à réguler.

II.2 Prestation du générateur MS3E

La MS3E qui caractérise le générateur à fréquence variable est illustrée par la figure (II.1). Il est constitué de trois machines synchrones reliées en cascade formant trois étages de la gauche vers la droite comme le montre le schéma de la figure (II.1).

Le premier étage est constitué d'une machine synchrone à aimants permanents MSAP qui permet au générateur MS3E un fonctionnement parfaitement autonome, en termes d'excitation. Les tensions triphasées délivrées par l'induit (stator) de ce premier étage (MSAP) sont redressées par un redresseur à diodes afin d'alimenter un hacheur connecté à la machine synchrone intermédiaire dont l'excitatrice de son inducteur est fixe et son induit triphasé est tournant (deuxième étage), donc il s'agit d'une machine synchrone à structure inversée composant le deuxième étage du MS3E.

Le hacheur permet de contrôler l'excitation de l'alternateur principal, constituant le premier étage du MS3E, dont l'induit fixe (stator) produit les tensions triphasées désirées, L'inducteur de l'alternateur principal est alimenté par l'induit tournant de l'excitatrice à travers des diodes tournantes. Aucun contact frottant, caractérisant le système bagues balais, ne figure dans ce MS3E, cela est évidemment obtenu au prix d'une complexité certaine de ce générateur. L'ensemble constitué par les deux premiers étages et les diodes tournantes est connu sous le nom d'excitatrice globale en bout d'arbre.

La fréquence des tensions de l'alternateur principal est liée à la vitesse de rotation commune aux trois machines. Ce générateur MS3E pourrait être intéressant dans beaucoup

d'applications où l'énergie électrique pourrait être produite à vitesse d'entraînement variable et particulièrement dans l'industrie, et la production de l'énergie embarquée et les énergies renouvelables [35].

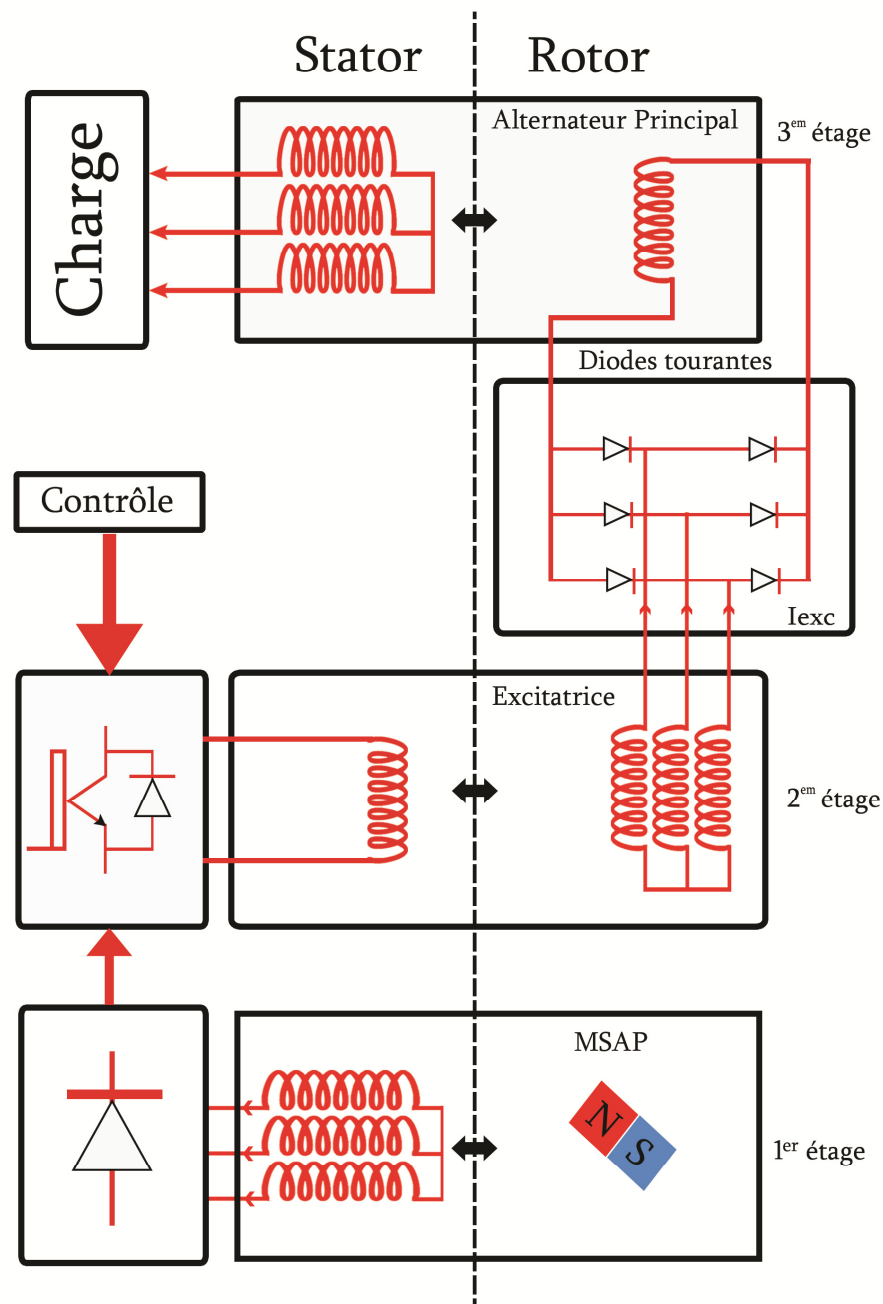


Figure (II.1) : Structure du générateur MS3E à trois étages

II.3 Schéma fonctionnel du MS3E

II.3.1 Modélisation et schéma fonctionnel de l'alternateur principal

En général, les machines réelles sont caractérisées par leurs enroulements et par leurs conceptions, pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes. On doit développer pour chaque type de machines, un modèle qui soit le plus proche possible du modèle réel pour pouvoir les commander rigoureusement.

Le MS3E est constitué par des machines synchrones voir figure (II.2) dont les modèles de connaissance sont pratiquement similaires à une différence près de la MSAP.

Il est bien connu que la transformation de Park appliquée au modèle triphasé de la machine synchrone à pôles saillants permet de le transformer en un modèle différentiel lié à la rotation synchrone de l'excitation continue de l'inducteur DC et à 2D par les composantes dites de Park indexées par les indices d et q.

En négligeant les effets des amortisseurs vu la faiblesse de leurs constantes de temps, ce système est donné par les équations suivantes voir figure (II.3) [36].

Alternateur principale

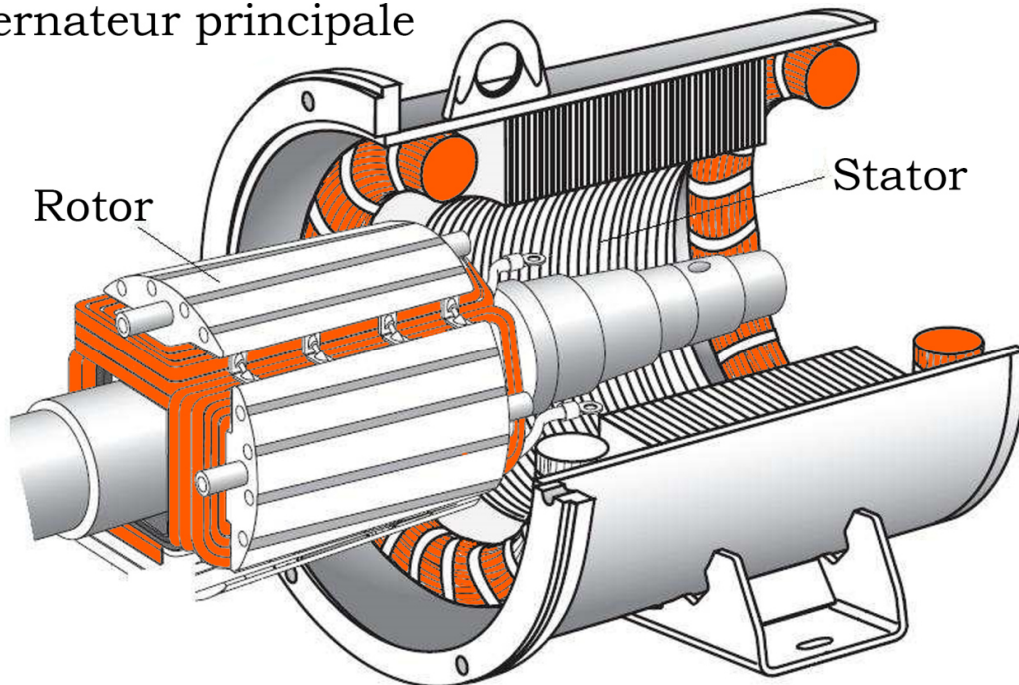


Figure (II.2) : Structure de l'alternateur principale

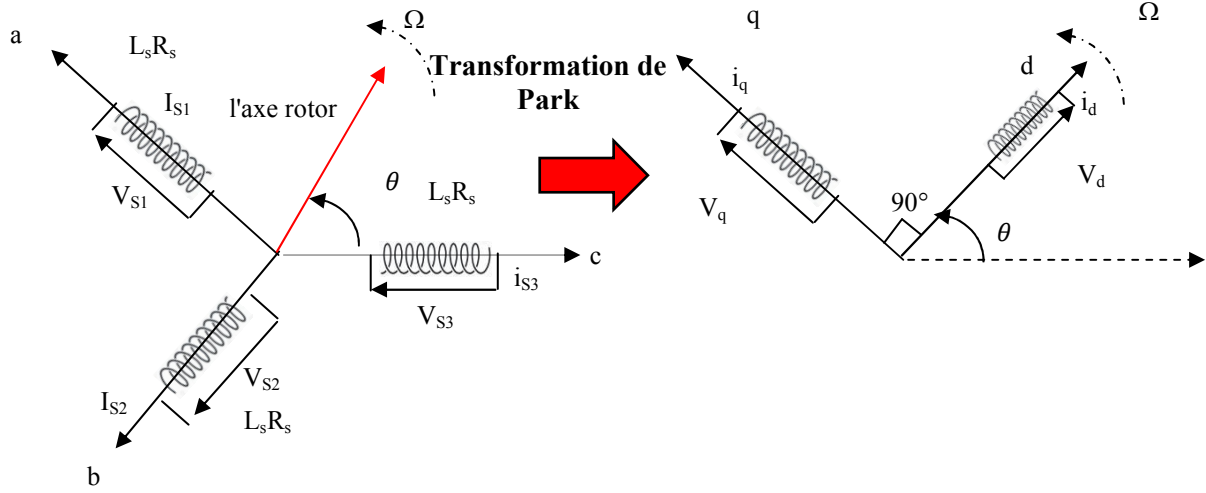


Figure (II.3) : Représentation de la transformation de Park

Equations des tensions :

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q \quad (\text{II.1})$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \phi_d \quad (\text{II.2})$$

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Equations des flux:

$$\phi_d = L_d i_d + M_{fd} i_f \quad (\text{II.4})$$

$$\phi_q = L_q i_q \quad (\text{II.5})$$

$$\phi_f = L_f i_f + M_{fd} i_d \quad (\text{II.6})$$

La substitution des équations du flux (II.4) et (II.5) dans les équations tensions (II.1) et (II.2), permet d'écrire sous forme matricielle le modèle tension du stator (ou induit) comme suit :

$$[V_s] = [Z_s][I_s] + M_{fd} \omega \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} i_f \quad (II.7)$$

Avec,

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}; \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (II.7-a)$$

$$[Z_s] = \begin{bmatrix} R_s + SL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + SL_q \end{bmatrix} \quad (II.7-b)$$

Où S est l'opérateur de Laplace ($S = d/dt$)

La substitution de l'équation du flux (II.6) dans l'équation tensions (II.3) de l'inducteur conduit en utilisant l'opérateur S à l'équation opérationnelle suivante :

$$i_f = \frac{1}{R_f + SL_f} U_f \quad (II.8)$$

Où,

$$U_f = V_f - e_{fd} \quad (II.8-a)$$

Avec,

$$e_{df} = S M_{fd} i_d \quad (II.8-b)$$

i_d représentant courant transitoire (nulle en continu).

L'introduction de l'équation (II.8) dans l'équation (II.7) conduit à écrire le modèle de la machine synchrone en optant pour le fonctionnement alternateur, par inversion du signe de matricielle (II.9,) on peut la formuler selon l'expression suivante:

$$[V_s] = [Z_s][I_s] + \frac{M_{fd} \omega}{R_f + SL_f} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \underbrace{(V_f - e_{df}(i_d))}_{U_f} \quad (II.9)$$

L'équation matricielle (II.9,) on peut la formuler selon l'expression suivante:

$$[V_s] = [Z_s][I_s] + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(\frac{M_{fd}}{R_f + SL_f} v_f - \frac{SM_{fd}^2}{R_f + SL_f} i_d \right)}_{[e_f]} \omega \quad (II.10)$$

Si l'alternateur est sensé à débiter sur une charge, les équations des composantes des tensions aux bornes de cette charge sont données par :

$$-V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} - \omega L_{ch} i_q \quad (II.11)$$

$$-V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{di_q}{dt} + \omega L_{ch} i_d \quad (II.12)$$

Les équations (II.11) et (II.12) sous forme matricielle et opérationnelle s'écrivent comme suit :

$$[-V_s] = [Z_{ch}] I_s \quad (II.13)$$

Avec,
$$[Z_{ch}] = \begin{bmatrix} R_{ch} + SL_{ch} & -\omega L_{ch} \\ \omega L_{ch} & R_{ch} + SL_{ch} \end{bmatrix} \quad (II.13-a)$$

Avec les équations matricielles (II.10) et (II.13), le schéma fonctionnel d'un alternateur alimentant une charge peut être illustré par la figure (II.4).

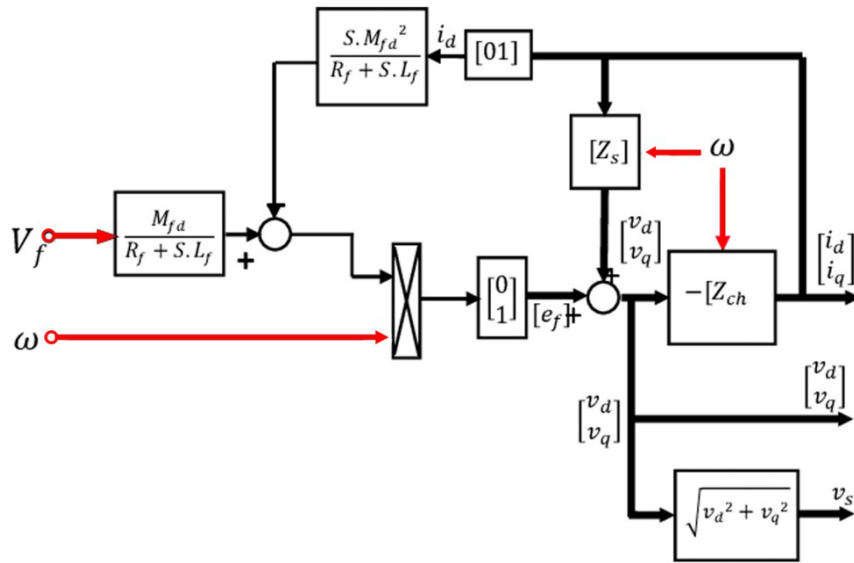


Figure (II.4) : Schéma fonctionnel de l'alternateur principal alimentant une charge inductive

II.3.2 Modélisation et schéma fonctionnel de l'excitatrice et le redresseur

Le système d'excitation qui fournit l'énergie à l'inducteur de l'alternateur principal est représenté par l'excitatrice qui est une machine synchrone triphasée sans amortisseur et dont les phases sont portées par le rotor avec un pont à six diodes connectées à ses bornes. Les six diodes montées sur une platine solidaire du rotor pour aller ensuite alimenter l'inducteur de l'alternateur principal, l'inducteur de l'excitatrice logé par le stator voir

figure (II.5).

La modélisation de l'excitatrice est faite par la même approche que pour l'alternateur principal, la tension d'excitation du système d'excitatrice sera considérée comme la source d'alimentation pour l'excitation de l'alternateur principal à travers un redresseur à diodes.

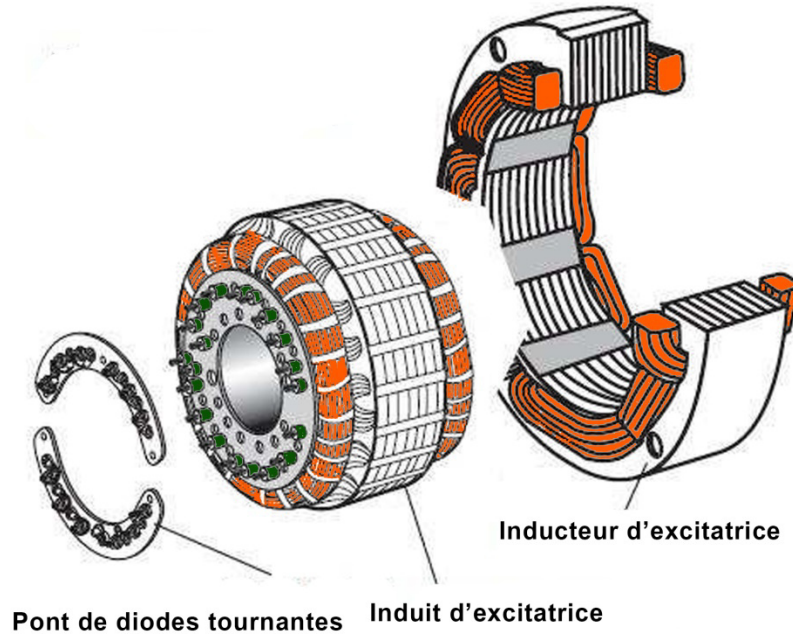


Figure (II.5) : Structure de connexion de l'excitatrice et les diodes tournantes

Concernant le développement du model de l'excitatrice, toutes les variables ramenées au stator par le model de l'excitatrice est identique aux équations de model alternateur principal, [37][38].

La tension efficace redressée de l'excitatrice est donnée par la formule suivante :

$$V_{\text{aff}_{\text{exc}}} = \frac{\sqrt{V_{\text{d}_{\text{exc}}}^2 + V_{\text{d}_{\text{exc}}}^2}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.14})$$

La valeur moyenne de la tension de sortie de redresseur pour un nombre de phases q alors:

$$V_{\text{DC}} = \frac{2q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cdot V_{\text{aff}_{\text{exc}}} \quad (\text{II.15})$$

Pour calculer les nouvelles valeurs de la charge de l'excitatrice après le redressement, une égalité des puissances entre l'entrée et la sortie de la convection permet d'écrire que:

$$P_{\text{AC}} = 3 \cdot V_{\text{aff}_{\text{exc}}} \cdot I_{\text{aff}_{\text{exc}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{exc}}) = V_{\text{DC}} \cdot I_{\text{DC}} = P_{\text{DC}} \quad (\text{II.16})$$

Donc, on peut ramener du côté alternatif ce qui est vu en continu tel qu'en terme de

puissance active, si on néglige les pertes dans les diodes, on a:

$$P_{AC} = \frac{3 \cdot V_{eff_exc}^2}{R_{l_exc}} = \frac{V_{DC}^2}{R_f} = P_{DC} \quad (II.17)$$

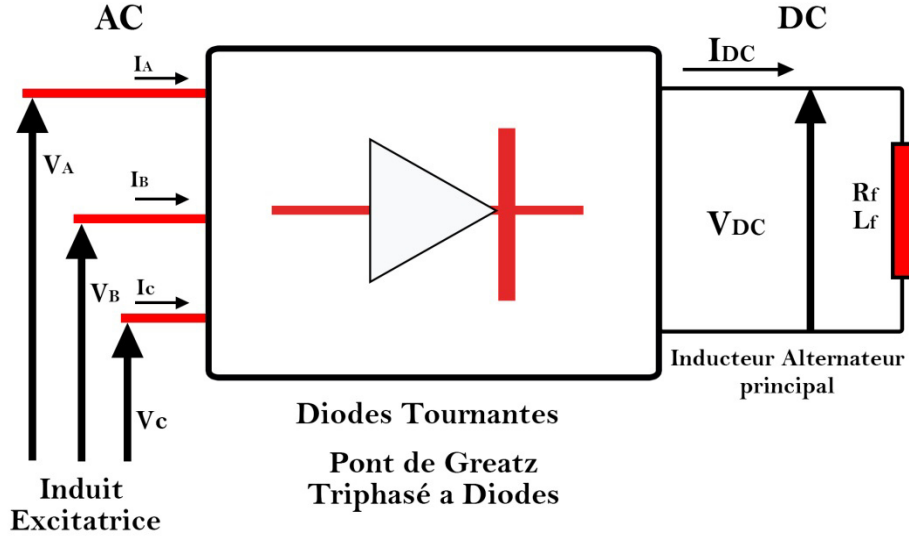


Figure (II.6) : Conversion des paramètres DC vers AC de l'Excitatrice à travers les diodes tournantes

A partir des connaissances à extraire du cours de l'électronique de puissance, on écrit ce qui suit [39].

Tension continue (redressée moyenne) pour q phases:

$$V_{DC} = \frac{2q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cdot V_{eff_exc} \quad (II.18)$$

Pour le cas triphasé:

$$q = 3 \rightarrow V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{eff_exc} \quad (II.19)$$

Courant continu (redressé continu) pour q phases:

$$I_{DC} = \sqrt{\frac{q}{2}} I_{eff_exc} \quad (II.20)$$

Pour le cas triphasé:

$$q = 3 \rightarrow I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{eff_exc} \quad (II.21)$$

Egalité des puissances AC & DC permet d'écrire que:

$$P_{AC} = P_{DC} \quad (II.22)$$

Donc, on peut ramener le côté alternatif ce qui est vu en continu tel qu'en termes de la puissance active voir figure (II.6). Si on néglige les pertes dans les diodes on aura:

$$P_{AC_{Actif}} = \frac{3V_{eff}^2}{R_{ch}} = \frac{V_{DC}^2}{R_f} = P_{DC} \quad (II.23)$$

Ce qui donne après calcul côté alternatif :

$$R_{l_{exc}} = \frac{\pi^2}{9} R_f \quad (II.24)$$

D'autre part, on peut identifier L_{ch} par :

$$L_{ch_{exc}} \cdot \omega = R_{ch_{exc}} \cdot \tan(\varphi_{exc}) = R_{ch_{exc}} \sqrt{\frac{1}{\cos^2(\varphi_{exc})} - 1} \quad (II.25)$$

Soit

$$L_{ch_{exc}} = \frac{1}{\omega} R_{ch_{exc}} \cdot \tan(\varphi_{exc}) = \frac{1}{3\omega} R_{ch_{exc}} \sqrt{2\pi^2 - 9} \quad (II.26)$$

$L_{ch_{exc}}$: Relativement faible

Ces équations sont intégrées dans le modèle global de simulation.

II.3.3 Modélisation et schéma fonctionnel de la MSAP

Le MSAP fournit la puissance au système de commande de l'excitation. L'application de la transformation de Park à la MSAP correspond à une transformation des trois bobines (statorique), à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de fem , flux et couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle.

On suppose que le rotor de la machine est lisse et le circuit magnétique n'est pas saturé voir figure (II.7), selon la figure(II.8) on définit les équations suivantes:

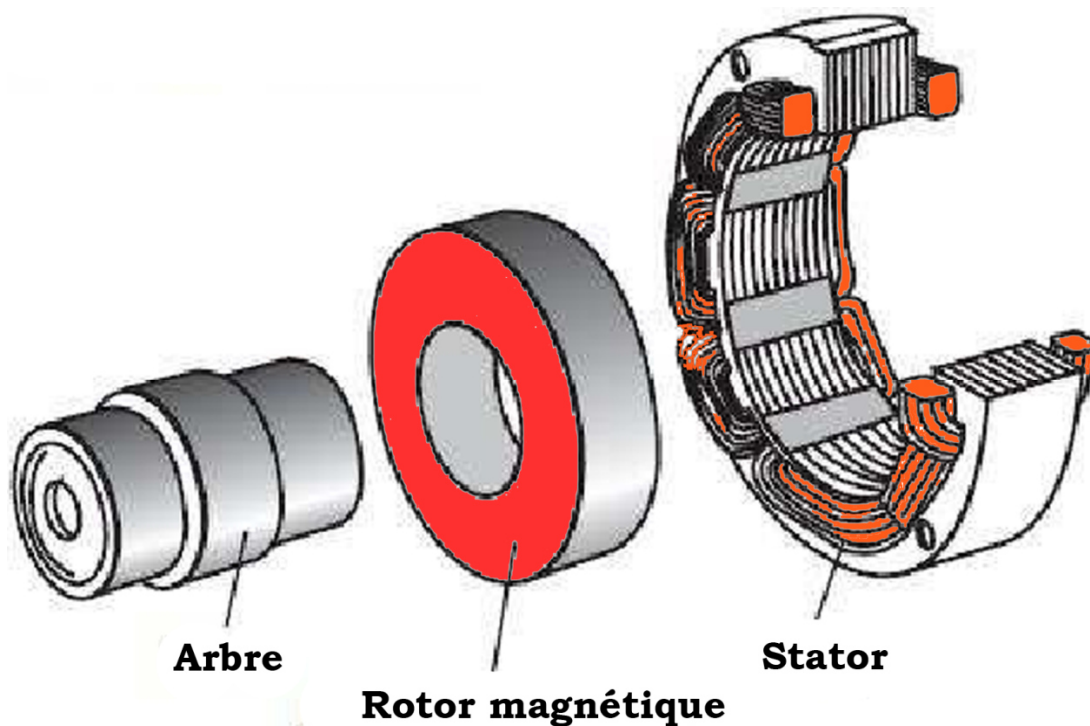


Figure (II.7) : Structure de la machine synchrone aimant permanent

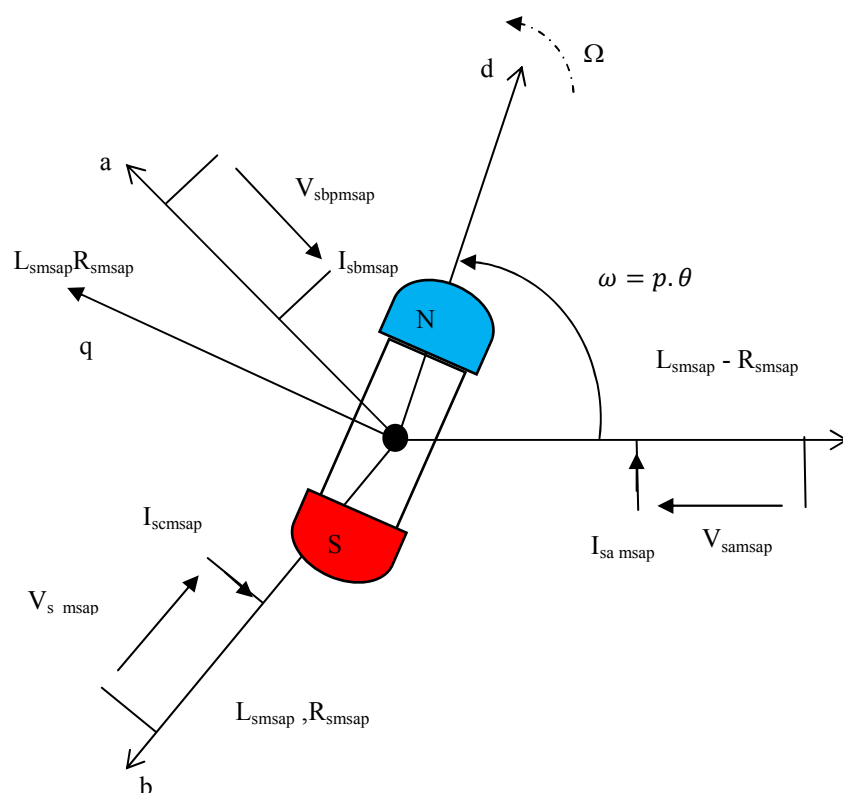


Figure (II.8) : Représentation de la transformation de Park pour MSAP.

Equations des tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{s_{msap}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{s_{msap}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s_{msap}} \end{bmatrix} + \phi_{msap} \cdot \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

Avec,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{s_{msap}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_{d_{msap}} & V_{q_{msap}} \end{bmatrix}^t; \\ \begin{bmatrix} I_{s_{msap}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{d_{msap}} & I_{q_{msap}} \end{bmatrix}^t; \\ \begin{bmatrix} Z_{s_{msap}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{s_{msap}} + S \cdot L_{d_{msap}} & -\omega L_{q_{msap}} \\ \omega L_{d_{msap}} & R_{s_{msap}} + S \cdot L_{q_{msap}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Equations des flux voir figure (II.9):

$$\phi_{d_{msap}} = L_{d_{msap}} i_{d_{msap}} + \phi_f \quad (II.28)$$

$$\phi_{q_{msap}} = L_{q_{msap}} i_{q_{msap}} \quad (II.29)$$

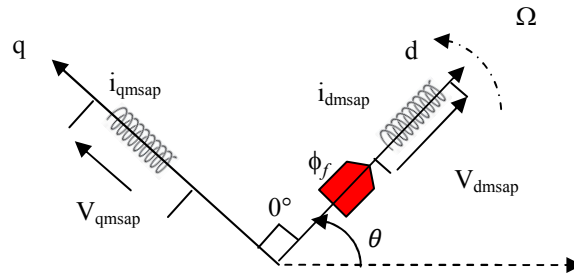


Figure (II.9) : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)

Les symboles des dernières équations sont les mêmes que ceux décrits précédemment, la vitesse mécanique de la machine MSAP est considérée comme variable.

Lorsque l'alternateur est chargé, les composantes directes et en quadrature des tensions sont :

$$\text{Données par: } \begin{cases} -V_{d_{msap}} = R_{ch_{msap}} \cdot i_{d_{msap}} + L_{ch_{msap}} \frac{di_{d_{msap}}}{dt} - \omega \cdot L_{ch_{msap}} \cdot i_{q_{msap}} \\ -V_{q_{msap}} = R_{ch_{msap}} \cdot i_{q_{msap}} + L_{ch_{msap}} \frac{di_{q_{msap}}}{dt} - \omega \cdot L_{ch_{msap}} \cdot i_{d_{msap}} \end{cases} \quad (II.30)$$

Les équations (II.27) et (II.28) sous forme matricielle et opérationnelle sont écrites comme:

$$[-V_{s_{msap}}] = [Z_{ch_{msap}}] \cdot [I_{s_{msap}}] \quad (II.31)$$

Avec,

$$[Z_{ch_{msap}}] = \begin{bmatrix} R_{ch_{msap}} + S \cdot L_{ch_{msap}} & -\omega \cdot L_{ch_{msap}} \\ \omega \cdot L_{ch_{msap}} & R_{ch_{msap}} + S \cdot L_{ch_{msap}} \end{bmatrix}$$

Avec les équations matricielles (II.30) et (II.31), le schéma fonctionnel d'un alternateur alimentant une charge peut être illustré par la figure (II.10).

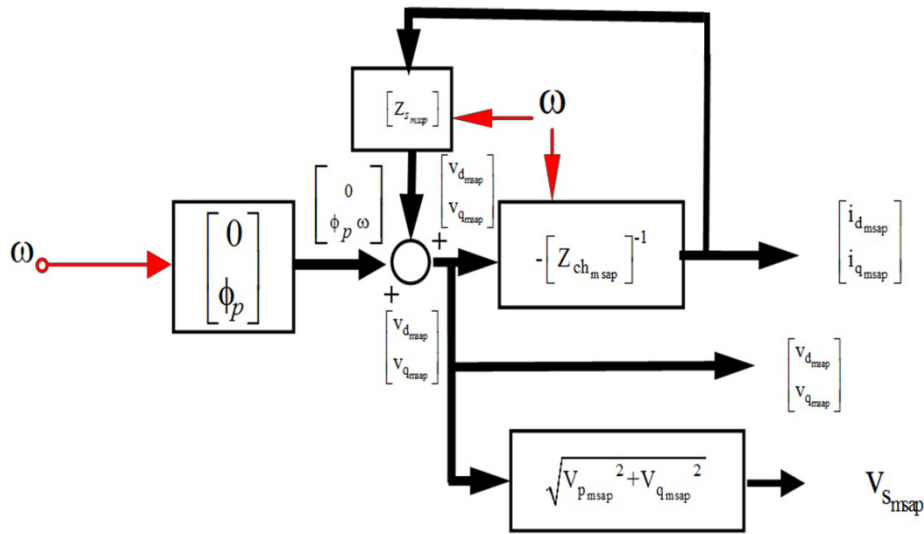


Figure (II.10) : Schéma fonctionnel de MSAP alimentant une charge inductive

II.4 Conclusion

A travers ce chapitre, on a développé une méthodologie de modélisation de la machine synchrone à trois étages fonctionnant en générateur en vue de sa commande à vitesse et charge variables, on a donc présenté les différents modèles de chacun des sous-systèmes composant la machine.

Ces modèles mathématiques, nous permettent certainement d'aborder le problème de la commande avec plus de précision et d'efficacité, dans le chapitre suivant. On étudiera l'influence des perturbations, de la vitesse et de la charge sur la stabilité de la machine du point de vue dynamique et statique. Dans ce qui suit on donnera une description sur le PSO, l'historique des méthodes d'optimisation avec leurs importances ainsi leurs applications, accompagné par la présentation du critère d'optimisation des paramètres PID.

Chapitre III

OPTIMISATION DES PARAMETRES DES REGULATEURS PID PAR LA PSO – ETAT DE L'ART

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES PARAMETRES

DES REGULATEURS PID PAR LA PSO – ETAT DE L'ART

III.1 Introduction

La recherche d'un état optimal occupe une grande place dans différents domaines telles que l'industrie, l'informatique...etc. Cette recherche qui est considérée comme l'un des fondements de notre monde actuel.

En effet, plusieurs problèmes scientifiques ou économiques ont des variables qui peuvent être adaptées pour fournir un résultat plus désirable.

Multiple études ont été menées dans le domaine de l'optimisation comme l'illustre les nombreux travaux dans des journaux de renommé. Aujourd'hui, les domaines de la science appliquent et utilisent des approches d'optimisation. Les problèmes d'optimisation sont souvent définis comme une minimisation de consommation on cherche à mieux gérer son temps.

Des méthodes ont été développées pour résoudre ces problèmes, dits « difficiles » (qui ont un nombre important d'extrema locaux), qui déterminent des solutions qui ne sont pas optimales, mais qui s'en rapprochent.

Ces techniques, qui peuvent être regroupées en deux catégories: les méthodes heuristiques et métaheuristiques. Le principe de base de ces méthodes est généralement un phénomène biologique, physique ou même basé sur le hasard.

La structure de ce chapitre est représenté comme suit: La section 2 décrit la difficulté de l'optimisation des problèmes mono-objectifs. Dans la section 3, un état de l'art des métaheuristiques d'optimisation est présenté.

Nous détaillerons, dans la section 4, l'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais. La méthode qui compose le sujet principal de ce travail de thèse. L'Optimisation par Essaim Particulaire est une métaheuristique découverte par Kennedy et Eberhart en 1995. Elle est basée sur le comportement social des animaux progressant en essaim.

L'ensemble des particules d'un essaim échangent directement avec leurs voisines et élaborent ainsi une solution à un problème, en se basant sur leur expérience collective.

Enfin, dans la section 5, nous présenterons l'application et la formulation de notre problématique qui est l'optimisation des paramètres du contrôleur PID par la PSO.

III.2 Problème d'optimisation

Il existe un ensemble de problème pour lesquels les méthodes directes ou déterministes ne donnent pas une solution satisfaisante, une classe de ces problèmes ; les problèmes d'optimisation.

Mathématiquement parlant, cela correspond à la recherche des extrémums de fonctions à plusieurs variables.

Plusieurs méthodes d'optimisation ont été développées pour traiter les problèmes mathématiques linéaires ou non linéaires, soumis ou non à des contraintes. Nous pouvons distinguer deux types d'optimisation ; une recherche globale d'un optimum d'une fonction sur l'ensemble d'un domaine et la recherche locale d'une solution au voisinage d'un point.

III.2.1 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation

La forme générale d'un problème de dimension k est donnée comme :

$$\text{Problème} = \begin{cases} \min_x \text{ ou } \max_x f(x) \in \mathcal{R}^k \\ g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \\ h_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, q \\ x_{tmin} \leq x_t \leq x_{tmax}, \quad t = 1, \dots, k \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$f(x)$ est la fonction à optimiser (par une minimisation ou maximisation), assigné aussi par la fonction objectif. x est un vecteur de dimension k (x_k), qui représentent les variables à optimiser, $h_j(x)$ et $g_i(x)$ désignent les contraintes d'égalité et d'inégalité; x_{tmin} et x_{tmax} représentent les contraintes de domaine; $\mathcal{R}^k$ est l'espace de recherche limité par les contraintes de domaine.

L'ensemble de paramètres x représentent la solution du problème d'optimisation. Ces paramètres pour lesquels la fonction d'objectif donne une valeur optimum, dans le respect du domaine de variation et les contraintes d'égalité.

Dans l'approche mathématique, les zéros de la dérivée de la fonction seront l'objectif à trouver par optimisation. Même si la dérivée et dans la plupart des cas est exprimable, la détermination des zéros de la fonction reste difficile.

III.2.2. L'optimisation dans l'ingénierie

Le problème d'optimisation dans l'ingénierie, consiste d'utiliser une meilleurs formulation mathématique afin obtenir la meilleure solution du problème physique.

Pour un système donné, l'objectif est de déterminer l'ensemble de paramètres d'entrée qui donne la sortie souhaitée. Cet ensemble doit changer de façon à faire en sorte que la sortie du système converge vers la sortie prévue. Le concept d'un processus itératif est intuitivement ressentie.

Dans cette disposition, l'ordinateur reste l'outil idéal pour l'optimisation, du moment où le système et les variables influençant le processus sont discernés et peuvent être numérisés.

Donc l'objectif principal de l'optimisation est l'ajustement des variables ou les entrées d'un dispositif dans le but de trouver l'optimum, considéré comme la solution souhaitée.

A travers les divers travaux, et afin de représenter certains phénomènes de la nature des modèles linéaires simples ont été développés.

Néanmoins, plusieurs problèmes physiques sont non linéaires: des solutions très différentes sont obtenues par suite d'une petite variation de l'état initial et cela rend l'approche d'optimisation difficile.

Décider si, l'optimum trouvé correspond à la meilleurs solution (globale) ou c'est juste une solution locale, est considéré comme une autre difficulté de l'optimisation dans l'ingénierie.

L'optimisation d'un problème physique peut donc paraître comme extrêmement difficile. Les méthodes appliquées, habituellement aux problèmes non linéaires consistent généralement à minimiser l'espace de recherche à un espace assez petit afin de trouver une approximation linéaire.

III.2.3 Minimisation et maximisation dans l'optimisation

La formulation de l'optimisation d'une fonction objective est décrite dans l'équation (III.1). L'équation montre qu'il existe deux méthodes d'optimisation : par minimisation ou par maximisation de la fonction. La minimisation est utilisée dans la plupart des cas. Il se trouve où l'objectif est de maximiser la fonction.

III.2.3.1 Optimum global et local

La solution d'un problème qui a été trouvée par une approche d'optimisation, peut-elle être considérée comme unique ou la meilleure ? C'est le problème d'optimum global et local.

III.2.3.2 La meilleure solution

Le concept de "meilleure solution" dépend du problème à résoudre, à l'approche de résolution adoptée et aux tolérances admises. Donc, la formulation du problème influencera la solution optimale. Cependant, un problème peut avoir plusieurs solutions.

Le mot "meilleure solution" garantit alors qu'il y a une seule solution à un problème posé. Certains problèmes peuvent avoir plusieurs "meilleures solutions" en fonction des limites du domaine de variation des paramètres d'entrée.

Dans ce cas, on parlera d'extrema en sous-entendant qu'il puisse y avoir plusieurs "bonnes solutions" sur un grand espace compromettant les plus petits. Donc, la "meilleure solution" sera le meilleur extremum global des meilleures extrema locaux. Cependant si on trouve plusieurs extrema globaux, cela signifie que la fonction objective est ambiguë. C'est-à-dire que différents jeux de paramètres d'entrée donnent la même sortie souhaitée, un résultat peut avoir plusieurs causes.

Le problème, dans ce cas, est dit "mal posé". Cela pourra être un avantage lors que le système est contrôlé par un utilisateur qu'il a le choix des entrées pour obtenir la sortie désirée. Ceci pourra être le cas pour les systèmes artificiel. Dans un système où l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le choix des entrées, cela devient un inconvénient

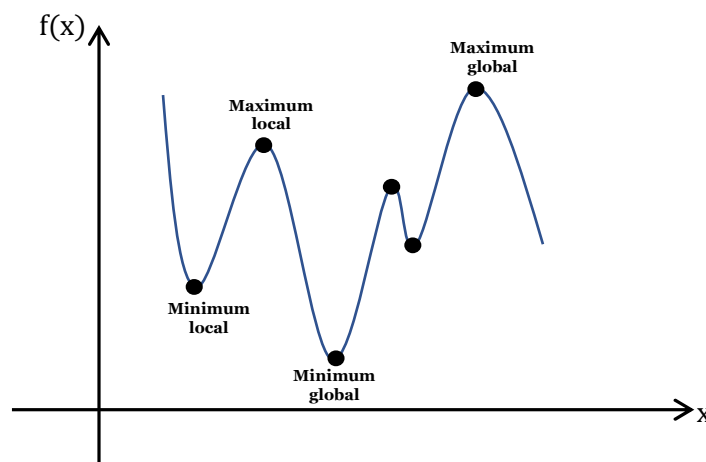


Figure (III.1) : Les minimums et le maximum local et global d'une fonction

La notion d'optima locaux et globaux d'une fonction $f(x)$ sont illustrés dans la figure (III.1).

Si une fonction contient un seul minimum local sera nommée unimodale. Sinon, elle est appelée multimodale.

III.3 Les méthodes d'optimisation - état de l'art

En fonction de la nature mathématique du problème, les méthodes d'optimisation peuvent être classées en deux grandes catégories.

III.3.1 Problèmes d'optimisation contraints

Pour les problèmes d'optimisation contraints, au moins une fonction de contrainte $g_i(\mathbf{x})$ ou $h_j(\mathbf{x})$ est décrite dans la représentation du problème. La résolution de ce classement de problème peut être obtenue par deux techniques: les approches de transformation (ou indirectes) et les approches directes (ou primales).

-Les approches de transformation (ou indirectes) [40][41] sont basées sur la transformation du problème initial avec ses contraintes en sous-problèmes équivalents sans contrainte, par l'introduction des contraintes dans la fonction d'objectif. Nombreux algorithmes utilisent cette approche d'optimisation. A titre d'exemple ; l'algorithme de pénalité [42], du Lagrangien augmenté [43] et des asymptotes mobiles [44].

-Les approches directes (ou primales) [40], [45] qui consistent à résoudre directement le problème original avec les contraintes. La solution est trouvée de deux manières; soit par optimisation unidirectionnelle soit par le remplacement du problème initial par un ensemble de sous-problèmes approximatifs. Nombreux algorithmes basés sur cette approche ont été développés, nous pouvons citer la méthode du gradient réduit ou celle du gradient projeté [45], la méthode de l'ellipsoïde [46] et la méthode de programmation quadratique récursive, [47].

III.3.2 Problèmes d'optimisation non contraints

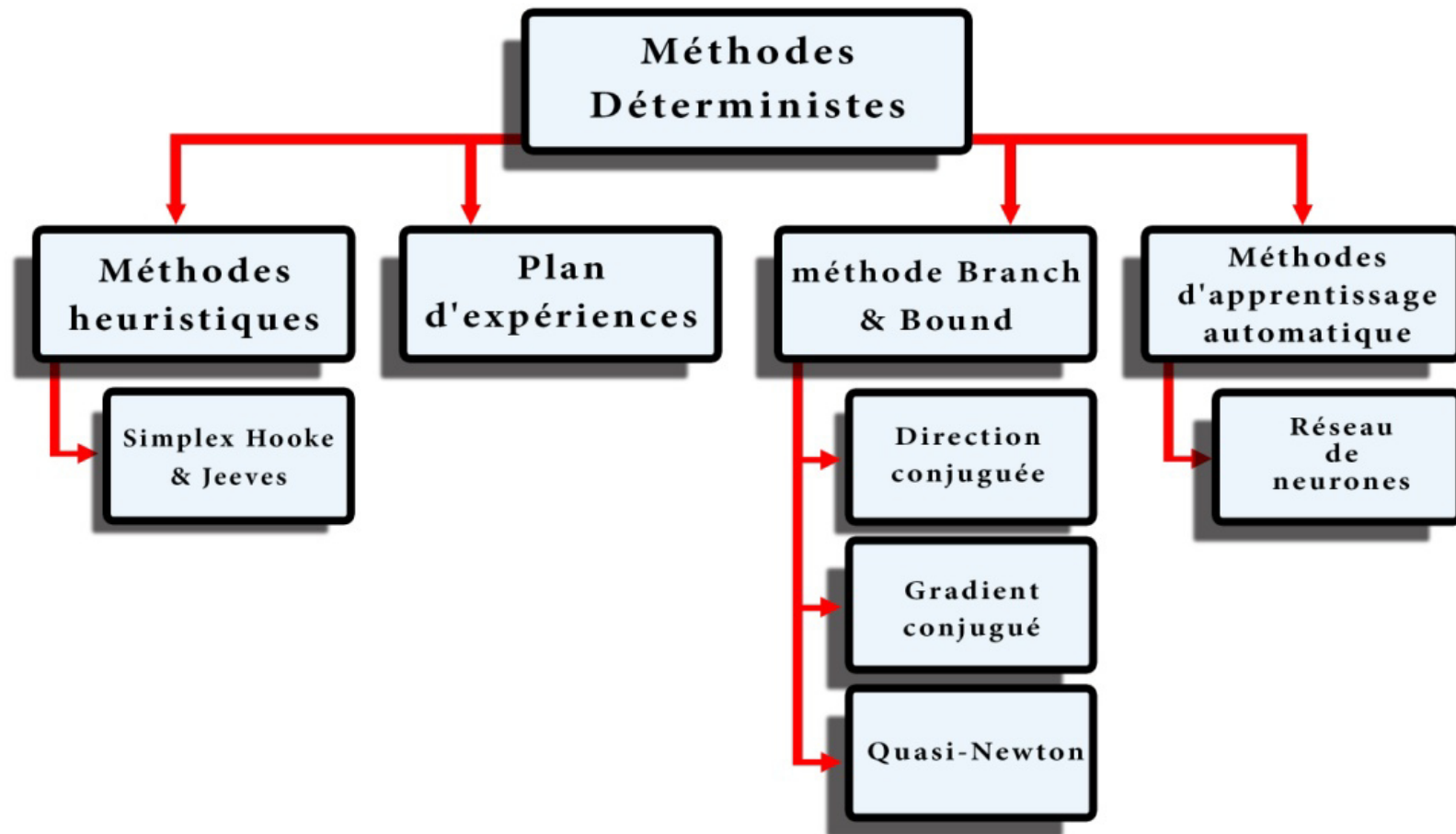
Pour un problème d'optimisation non contraint, la question qui se pose est de savoir si les fonctions de contraintes, $g_i(\mathbf{x})$ et $h_j(\mathbf{x})$ décrites dans l'équation (III.1), apparaissent ou pas dans la représentation du problème. La classification des problèmes en fonction de formulation mathématique de la fonction objective; linéaire ou non linéaire, unidimensionnelle ou multidimensionnelle et différentiable ou non différentiable, détermine la méthode à utiliser pour le résoudre.

Afin de déterminer la solution optimum du problème, différentes méthodes peuvent être appliquées. On peut regrouper, ces méthodes en deux grandes catégories: les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

-Les méthodes déterministes sont des algorithmes qui, pendant leur évolution vers la solution, restent dépendantes des données initiales. Donc le choix des données initiales affecte la résolution du problème.

Ces méthodes qui sont souvent considérées comme des algorithmes efficaces et peu coûteuses. Mais la dépendance aux données initiales et la convergence vers la solution optimum la plus proche du point initial, qu'il soit local ou global reste les deux inconvénients majeur de ces méthodes.

En fonction de la nature mathématique du problème nous pouvons citer différentes sous-méthodes déterministes, par exemple pour les problèmes unidimensionnels nous citons : les méthodes de Fibonacci [48] et Brent [49] et pour les problèmes multidimensionnels, plusieurs méthodes sont utilisées. Des méthodes analytiques comme quasi-Newton [45][50] et du gradient conjugué [45][50] et des méthodes heuristiques comme Hookeet Jeeves [51] et du simplex [52].



Figure(III.2) : Méthodes d'optimisation déterministes

-Les méthodes stochastiques sont basées sur des processus d'évolution aléatoires et probabilistes.

A l'inverse des méthodes déterministes, ces méthodes s'appuient sur des transitions consécutives qui peuvent emmener à des solutions similaires pour différentes données initiales. Ces méthodes présentent plusieurs avantages comme qu'elles ne contraignent pas la connaissance a priori de la dérivée de la fonction objective, ni du point de départ adapté pour accéder à la solution optimale qui est dans la plupart des cas l'optimum global.

Nous distinguons différentes sous méthodes stochastiques, comme : la méthode du [53], [54] ou la recherche tabou [55] et des méthodes évolutionnistes. Les méthodes évolutionnistes [48], [56] s'appuient sur un même principe. Le principe de base consiste à améliorer progressivement l'ensemble de solutions possible, au lieu de considérer une seule solution.

Durant ces dernières années, quelques algorithmes d'optimisation ont été regroupés sous l'appellation d'algorithmes d'optimisation naturels qui reproduisent des phénomènes observés dans la nature.

Nous pouvons citer parmi ces méthodes ; l'algorithme génétique[57], l'optimisation par essaim de particules [53] ou l'optimisation par colonie de fourmis [59].

Ces algorithmes sont basés sur une recherche intelligente dans un grand espace et qui utilise des approches statistiques. Ces méthodes procréent de nouveaux points dans l'espace des solutions possibles par l'application des opérateurs à une itération donnée pour se converger vers des zones plus désirables à l'itération suivante.

Ces méthodes ne contraignent pas le calcul de la dérivée de la fonction objective, donc elles peuvent utiliser des paramètres discrets et des fonctions objectives non continues.

Les plus connues des méthodes stochastiques sont illustrées à la Figure (III.3)

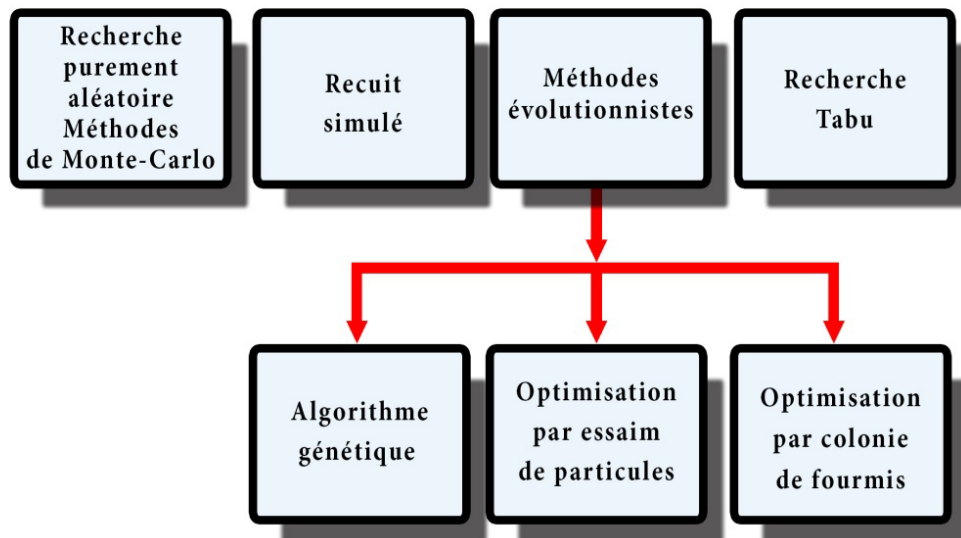


Figure (III.3) : Méthodes d'optimisation stochastiques

III.3.3 Efficacité d'une méthode d'optimisation

L'efficacité d'une méthode d'optimisation dépendra de sa sensibilité, à sa robustesse par rapport aux conditions initiales et aux paramètres de contrôle.

Quand les conditions initiales (ou les paramètres de contrôle) prendront une valeur précise afin que la méthode d'optimisation converge vers l'optimum, la méthode est considérée comme sensible par rapport à ces mêmes conditions initiales (ou par rapport aux paramètres de contrôle).

Une méthode d'optimisation est robuste si pour les mêmes conditions initiales et valeur des paramètres de contrôle, sera capable de déterminer l'optimum de fonctions très différentes.

Une méthode d'optimisation est idéale lorsqu'elle est totalement indifférente aux paramètres de contrôle et aux conditions initiales, et quelle que soit la forme de la fonction à tester convergera vers l'optimum.

III.3.4 Opérateurs de recherche fondamentaux

Généralement la recherche de l'optimum d'une fonction est achevée par l'utilisation de deux opérateurs fondamentaux : l'exploration et l'exploitation.

- L'exploration a pour but de positionner l'optimum de la fonction, cela signifie rechercher (ou localiser) une vallée dans le cas de minimisation ou un sommet dans cas de maximisation.

- L'exploitation a pour objectif d'affermir l'exploration en approuvant l'ascension du sommet ou la descente au creux de la vallée.

Dans la plupart du temps l'efficacité et le succès d'une technique d'optimisation dépendent d'un ajustement entre l'exploitation et l'exploration.

III.4 Optimisation par PSO

Plusieurs scientifiques ont créé des modèles interprétant le mouvement des vols d'oiseaux et des bancs de poissons. Plus particulièrement, Reynolds [60] et Heppner et al. [61] ont présenté des simulations sur un vol d'oiseaux.

Reynolds était intrigué par l'aspect esthétique du déplacement des oiseaux en groupe et Heppner, un zoologue, était intéressé à comprendre les règles permettant à un grand nombre d'oiseaux de voler en groupe : soit de voler sans se heurter, de changer soudainement de direction, de s'écarter et de se rapprocher de nouveau.

Cette étude a grandement inspiré le développement de l'algorithme PSO. En effet, lors de simulations des modèles mathématiques décrivant les vols d'oiseaux, Wilson [62] a suggéré que ces types de modèles pourraient très bien s'appliquer à la recherche de points caractéristiques dans un espace de recherche.

Sa réflexion se base sur le fait que, lors de l'installation d'une mangeoire à oiseaux dans une cour, même si aucun oiseau ne l'a jamais visitée, après quelques heures de patience un grand nombre d'oiseaux viendront y manger. Lors des simulations de Wilson, la volée d'oiseaux cherchait une mangeoire dans un espace donné et finissait par découvrir son emplacement.

En utilisant les algorithmes de modélisation de Heppner [61] et de Reynolds [60], et en modifiant le modèle mathématique de Wilson [62], Kennedy et Eberhart [63] ont transformé le tout en un vol d'oiseaux cherchant le « mangeoire » le plus gros dans un lot

de mangeoires contenus dans une région prédéterminée. L'algorithme d'optimisation PSO a ainsi vu le jour.

III.4.1 Description algorithmique

L'algorithme PSO est généralement introduit en relatant son développement conceptuel. Tel que mentionné, cet algorithme a vu le jour sous la forme d'une simulation simplifiée d'un milieu social, tel que le déplacement des oiseaux à l'intérieur d'une volée. Pour cet algorithme une redéfinition des termes est nécessaire; une population représente le vol d'oiseaux et un agent ou particule représente chaque oiseau de la volée.

Lors de l'initialisation de PSO, chaque particule est positionnée aléatoirement dans l'espace de recherche. Pour définir ce positionnement il faut connaître la plage des valeurs de chaque dimension (paramètres) à optimiser. Puis, la vitesse initiale de chaque particule est aléatoirement choisie.

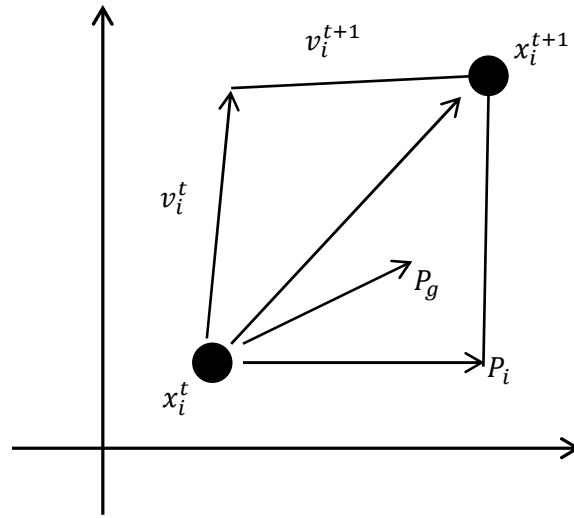
Pour choisir cette vitesse, l'algorithme requiert une vitesse maximale absolue pour chaque dimension. La vitesse peut être négative mais le signe n'indique que le sens dans lequel la particule se déplace.

Il est fortement conseillé d'initialiser la première particule à l'aide d'une valeur connue [64]. Lors de l'optimisation des paramètres dans l'espace de recherche, ceux-ci possèdent généralement des valeurs par défaut.

Ces valeurs deviennent le point de départ de la recherche. L'initialisation de la première particule avec de telles valeurs permet d'obtenir, dès la première itération, une valeur de pertinence (qualité) de base. Cette valeur peut servir de référence aux fins de comparaison et d'estimation de la performance en optimisation obtenue à l'aide de PSO.

Chaque particule connaît son emplacement ($\mathbf{x}_i$), sa vitesse de déplacement ($\mathbf{v}_i$), la position où elle a obtenu sa meilleure qualité ($\bar{\mathbf{P}}_i$) ainsi que la position de la meilleure qualité obtenue par l'ensemble des particules ($\bar{\mathbf{P}}_g$) et ce, à chaque itération (t) de l'algorithme PSO. En tenant compte de ces valeurs, la vitesse et la position de déplacement de chaque particule est mise à jour. La figure(III.4) présente la mise d'une particule avec l'algorithme PSO.

Le but de l'algorithme PSO est d'optimiser une fonction continue dans un espace donné. Dans la majorité des cas, l'algorithme d'optimisation recherche le maximum ou le minimum global de l'espace de recherche. Voici la description des étapes de l'algorithme PSO :



Figure(III.4) : Mise à jour d'une particule avec l'algorithme PSO

Étape 0 :

Si le critère d'arrêt est vérifié, alors l'algorithme se termine. S'il ne l'est pas, une nouvelle itération commence en retournant à l'Étape 1 avec la première particule ($i = 1$).

Le critère d'arrêt correspond généralement à un nombre d'itérations prédéfinies, mais on peut également spécifier un critère d'arrêt en fonction de la meilleure valeur de qualité $G(\bar{p}_g)$ obtenue pour l'ensemble des particules.

Pour toutes les particules de la population, exécuter les Étapes 1 à 5.

Étape 1 :

Calcul de la qualité $G(\bar{x}_i)$ de la particule i en fonction de son vecteur de position $(\bar{x}_i)$.

Étape 2 :

Établir si la qualité $G(\bar{x}_i)$ obtenue par la particule i est supérieure à la meilleure qualité que cette particule a obtenue antérieurement. Si $G(\bar{x}_i) > G(\bar{p}_i)$, la présente position de la particule $\bar{x}_i$ est sauvegardée comme étant la meilleure position $\bar{p}_i$ obtenue à ce jour pour la particule i .

Étape 3 :

Établir si la qualité $G(\bar{p}_i)$ obtenue par la particule i est plus grande que la meilleure qualité $G(\bar{p}_g)$ obtenue pour l'ensemble de la population. Si tel est le cas, l'indice de la particule ayant obtenu la meilleure qualité g prend la valeur i .

Étape 4 :

Mettre à jour la vitesse de déplacement $\bar{v}_i(t)$ de la particule i . Cette actualisation tient compte de la vitesse précédente de la particule $\bar{v}_i(t-1)$, de sa position présente $(\bar{x}_i)$, de la position de la meilleure qualité $\bar{p}_i$ obtenue par cette particule ainsi que de la position de la meilleure qualité globale $\bar{p}_g$ obtenue par la population.

De plus, deux paramètres, φ_1 et φ_2 , sont utilisés pour ajuster l'importance des termes $(p_{ld} - x_{ld}(t-1))$ et $(p_{gd} - x_{ld}(t-1))$ de l'équation de mise à jour de la vitesse (III.3).

Une fois cette vitesse mise à jour, il faut vérifier si la nouvelle vitesse $\bar{v}_i(t)$ de la particule i est contenue dans les limites autorisées $\bar{v}_i \in (-V_{max}, +V_{max})$. Si tel n'est pas le cas, la nouvelle vitesse est réduite à la borne la plus proche.

Étape 5 :

Mettre à jour la position $\bar{x}_i(t)$ de la particule i .

Cette mise à jour tient compte de la position précédente de la particule $\bar{x}_i(t-1)$ ainsi que de la nouvelle vitesse $\bar{v}_i(t)$ calculée à l'étape 4.

Une fois la position de la particule i mise à jour, il faut vérifier si la nouvelle position $\bar{x}_i(t)$ est contenue dans l'espace de recherche spécifié par $\bar{x}_i \in (X_{min}, X_{max})$. Si tel n'est pas le cas, la nouvelle position est ramenée à la borne la plus proche.

L'algorithme 1 présente un sommaire de l'algorithme PSO tel que présenté par J. Kennedy et R. Eberhart.[63] [64].

Optimisation par Essais Particulaires OEP

-
- 1 Initialiser aléatoirement les paramètres : $\bar{x}_i, \bar{v}_i, V_{max}, X_{max}, X_{min}$
 - 2 for $t = 1$ au temps maximum
 - 3 for $i = 1$ au nombre de particules
 - 4 if $G(\bar{x}_i) > G(\bar{p}_i)$ // $G()$ évaluer la qualité
 - 5 $\bar{p}_i = \bar{x}_i$ // $\bar{p}_{id}$ meilleure position
 - 6 Endif
-

```

7       $g = i$  // arbitraire
8      for  $j = \text{index des voisins de la particule } i$ 
9          if  $G(\bar{p}_j) > G(\bar{p}_g)$  then  $g = j$  // index de la meilleure particule globale
10     next  $j$ 
11      $\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) + \varphi_1(\bar{p}_i - \bar{x}_i(t-1)) + \varphi_2(\bar{p}_g - \bar{x}_i(t-1))$   $\bar{v}_i \in (-V_{max}, +V_{max})$ 
12      $\bar{x}_i(t) = \bar{x}_i(t-1) + \bar{v}_i(t)$   $\bar{x}_i \in (V_{min}, X_{max})$ 
13     next  $i$ 
14     next  $t$ , jusqu'à obtention du critère d'arrêt

```

III.4.2 Valeurs des paramètres φ_1 et φ_2

L'équation la plus importante dans l'algorithme PSO est la mise à jour de la vitesse de déplacement des particules $\bar{\mathbf{v}}_i(\mathbf{t})$:

$$\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) + \varphi_1(\bar{p}_i - \bar{x}_i(t-1)) + \varphi_2(\bar{p}_g - \bar{x}_i(t-1)) \quad (\text{III.2})$$

Les valeurs des paramètres φ_1 et φ_2 ont été l'objet d'une recherche. Après un nombre important de simulations et bien des tentatives, Kennedy et Eberhart [63] ont proposé un modèle simple pour ces deux valeurs. Ces deux variables seront d'une valeur aléatoire comprise entre 0 et 2 pour chaque mise à jour de chaque vitesse, et cela pour chaque particule. Bien que plusieurs autres méthodes d'attribution des paramètres φ_1 et φ_2 ont été proposées, ce modèle reste le plus performant [63].

$$\varphi_1 = 2 \cdot \text{rand}() \text{ et } \varphi_2 = 2 \cdot \text{rand}()$$

III.4.3 Poids inertiels

Shi et Eberhart [64] ont modifié la formule qui met à jour la vitesse en introduisant la notion de poids inertiel. Le poids inertiel ($w(\mathbf{t})$) est un paramètre utilisé pour équilibrer la force de la vitesse précédente de la particule. La formule de mise à jour de la vitesse d'une particule est maintenant :

$$\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) \cdot w(t) + 2 \cdot \text{rand}() \cdot (\bar{p}_i - \bar{x}_i(t-1)) + 2 \cdot \text{rand}() \cdot (\bar{p}_g - \bar{x}_i(t-1)) \quad (\text{III.3})$$

De nombreux tests ont également été effectués pour trouver la valeur optimale de $w(\mathbf{t})$ [65][66]. L'une des meilleures techniques trouvée consiste en une fonction linéaire diminuant la valeur de $w(\mathbf{t})$ de 0.9 à 0.4 sur le nombre maximal d'itérations à effectuer.

Ainsi, la valeur de $w(t)$ diminue légèrement après chaque itération PSO.

Au début d'une optimisation, les particules feront de grands déplacements. Ceci permettra d'explorer une importante partie de l'espace. Puis, à mesure que le nombre d'itérations augmente, la grandeur des déplacements des particules diminuera, permettant ainsi de raffiner la recherche.

III.4.4 Nombre de particules

Le choix du nombre de particules utilisées lors de l'optimisation est un autre sujet traité par Kennedy et Eberhart [67]. Bien que le nombre de particules optimum soit variable selon les types de problèmes à optimiser, il est généralement conseillé d'utiliser de 10 à 30 particules lors de l'emploi de l'algorithme PSO. Pour améliorer le résultat de l'optimisation, il est également recommandé de faire quelques cycles PSO lors de l'utilisation d'un petit nombre de particules, car cet algorithme est sensible aux valeurs initiales des particules.

On peut diminuer cette sensibilité en utilisant un grand nombre de particules (50 et plus) et ainsi n'exécuter qu'un seul cycle d'optimisation PSO.

III.5 Optimisation des paramètres du contrôleur PID

III.5.1 Formulation du problème d'optimisation

Dans ce problème, la tension de référence, le temps de réponse, et le dépassement sont utilisés pour optimiser les paramètres du contrôleur PID. PSO est utilisé pour minimiser la fonction objective F donnée par [68]:

$$F = (O_{sh} \cdot 10000) + t_{st}^2 + \frac{0.001}{\max_{dv}^2} \quad (III.4)$$

où O_{st} est le dépassement maximal du changement de tension de l'alternateur principal, t_{st} est le temps d'établissement du changement de la tension (s) et $\max_{dv}$ est la dérivée maximale de tension de l'alternateur principal.

III.5.2 Modélisation des essaims de particules

Dans notre application, les positions des particules x_i représentent les paramètres du contrôleur PID (K_p , K_i et K_d).

Chaque particule de l'essaim contient les informations suivantes:

1. elle occupe la position $\mathbf{x}_i$,
2. elle se déplace avec une vitesse $\mathbf{v}_i$,
3. la meilleure position est celle qui correspond à la meilleure particule de valeur de fitness obtenue jusqu'ici $\mathbf{pbest}_i$
4. la meilleure position globale est celle qui correspond à la meilleure valeur de fitness trouvée parmi toutes les particules $\mathbf{gbest}$.

La fonction de transfert du contrôleur PID $\mathbf{G(S)}$ est donnée :

$$\mathbf{G(S)} = K_p + \frac{K_i}{s} + s K_d \quad (\text{III.5})$$

L'aptitude d'une particule est déterminée à partir de sa position. La forme physique est définie de manière à ce qu'une particule proche de la solution ait une valeur de forme physique supérieure à celle d'une particule éloignée.

À chaque itération, les vitesses et les positions de toutes les particules sont mises à jour afin de les persuader de parvenir à une meilleure aptitude selon les équations suivantes:

$$\mathbf{v}_{ij}^{t+1} = w\mathbf{v}_{ij}^t + c_1\mathbf{rand}_{1j}^t(\mathbf{pbest}_{ij}^t - \mathbf{x}_{ij}^t) + c_2\mathbf{rand}_{2j}^t(\mathbf{gbest}_{ij}^t - \mathbf{x}_{ij}^t) \quad (\text{III.6})$$

$$\mathbf{x}_{ij}^{t+1} = \mathbf{x}_{ij}^t + \mathbf{v}_{ij}^{t+1} \quad (\text{III.7})$$

pour $j = 1$ à d où d est le nombre de dimensions, $i = 1..n$ où n est le nombre de particules, t est le nombre d'itérations, w est le poids d'inertie, $\mathbf{rand}_1$ et $\mathbf{rand}_2$ sont deux valeurs aléatoires uniformément répartis dans l'espace $[0,1]$ et φ_1 et φ_2 représentent les facteurs d'accélération.

Le φ_1 est la constante d'accélération cognitive qui propulse la particule vers la position où elle avait la meilleure forme physique. Le φ_2 est la constante d'accélération sociale qui dirige la particule vers la particule qui a actuellement la meilleure forme physique. Le poids d'inertie w affecte la contribution de la nouvelle vitesse. Si w est grand, il fait un grand pas en une itération (exploration de l'espace de recherche), tandis que si w est petit, il fait un petit pas en une itération, ayant ainsi tendance à rester dans une région locale [68].

En règle générale, la vitesse d'une particule est liée à des limites correctement choisies $\mathbf{v_{min}} < \mathbf{v_{ld}} < \mathbf{v_{max}}$ (dans la plupart des cas, $\mathbf{v_{min}} = -\mathbf{v_{max}}$). De même, la position

d'une particule est liée comme suit: $\mathbf{x}_{\min} < \mathbf{x}_{id} < \mathbf{x}_{\max}$.

Ensuite, chaque particule met à jour sa meilleure position personnelle en utilisant l'équation suivante:

$$pbest_i^{t+1} = \begin{cases} pbest_i^t & \text{if } (pbest_i^t) < f(x_i^{t+1}) \\ x_i^{t+1} & \text{if } (pbest_i^t) > f(x_i^{t+1}) \end{cases} \quad (III.8)$$

Enfin, le meilleur global de l'essaim est mis à jour à l'aide de l'équation suivante:

$$gbest^{t+1} = argminf(pbest_i^{t+1}) \quad (III.9)$$

Où f est une fonction qui évalue la valeur de la condition physique pour un poste donné.

Le processus PSO est répété de manière itérative jusqu'à ce que l'un des critères de terminaison suivants apparaisse [69]: si le nombre maximal d'itérations a été atteint, une solution acceptable aurait dû être trouvée ou aucune amélioration ne serait constatée sur plusieurs itérations.

Les paramètres de contrôle des PSO utilisés dans cette étude sont: la taille une population de 60 ans, une génération maximale de 100 ans, des facteurs d'accélération ($\varphi_1 = 0.5, \varphi_2 = 1.25$) et un poids d'inertie ($w = 0.6$). Il est à noter que tous les programmes sont développés sous le logiciel commercial Matlab/Simulink.

L'algorithme de contrôle de la machine synchrone à trois étages par PSO est représenté par plusieurs étapes.

1. Estimation des valeurs initiales de régulateur (K_d, K_i et K_p).
2. Choix du nombre d'itérations.
3. Calcul de la tension efficace V_t en utilisant le modèle de la machine synchrone à trois étages dans le repère (dq) et la valeur de tension d'excitation de contrôleur.
4. Vérification du critère qui a été choisi selon notre machine et les conditions imposées telle que la marge de la variation de la tension.
5. Si les conditions ou le critère est vérifié stop et fin sinon on recalcule les valeurs de régulateur par PSO.

III.6 Conclusion

La PSO se caractérise par une cognition d'ordre éthologique donc une forme de cognition sociale très intéressante. En effet, la PSO s'inspire des essaims et mime donc un comportement d'animaux sociaux en vue de résoudre un problème. La PSO a été appliquée avec succès dans des domaines aussi diversifiés.

Tout au long de ce chapitre, nous avons vu les aspects théoriques des méthodes d'optimisation, et plus particulièrement la PSO. À partir du moment où la sémantique du problème à résoudre peut s'énoncer sous forme d'une fonction à optimiser, la PSO s'applique. Dans le chapitre suivant, nous décrivons une application non usuelle des capacités d'optimisation de la PSO, Il s'agit d'optimiser les paramètres du contrôleur PID. Dans le chapitre suivant, nous décrivons une application non usuelle des capacités d'optimisation de la PSO, Il s'agit d'optimiser les paramètres du contrôleur PID.

Chapitre IV

COMMANDE ROBUSTE BASEE SUR
L'APPROCHE DE L'OPTIMISATION DES
PARAMETRES DES REGULATEURS
PID PAR LA PSO

CHAPITRE IV

COMMANDE ROBUSTE BASEE SUR L'APPROCHE DE L'OPTIMISATION DES PARAMETRES DES REGULATEURS PID PAR LA PSO

IV.1 Introduction

Un des objectifs assignés à ce type de MS3E est le contrôle pour pouvoir maintenir la tension de l'alternateur principal du groupe à une valeur constante aux bornes de la charge, lorsque la vitesse d'entraînement et la charge varient. Ce qui pourrait être possible en contrôlant la tension de l'alternateur principal via la tension de l'excitatrice du MS3E par deux régulateurs.

Dans ce travail, on préconise deux régulateurs PID optimisés basés sur l'algorithme émanant des PSO (Particle Swarm Optimization). Si la vitesse est tenue à être variable, l'efficacité de l'optimisation du PID-PSO est donc d'aboutir à réaliser une meilleure réinjection possible de cette vitesse, lorsque la tension de l'alternateur principal doit suivre sa référence désirée.

IV.2 Description de la méthode de commande

Une importante plage de variation de vitesse d'entraînement de la machine MS3E, se répercute sur la stabilité de la commande de la tension de sortie de l'alternateur principal. Pour remédier, plusieurs travaux ont été faits pour améliorer et développer de nouvelles techniques de commandes, la technique la plus récente, basée sur trois boucles centrées.

La boucle de centre c'est pour la régulation du courant d'excitation de l'excitatrice, le courant de référence de cette boucle est la somme de courant d'excitation de l'excitatrice, calculé à partir du courant I_d de l'alternateur principal et l'erreur de la tension de groupe[70-74].

Le premier courant représente la variation de la charge, alors que le deuxième est lié à la vitesse de rotation de groupe.

Cette technique assure la stabilité de la tension totale de l'alternateur, le système rejette toutes perturbations quelque soit la vitesse de rotation ou la variation de la charge, mais présente des complications pour l'implantation expérimentale[75].

Dans le but d'avoir une meilleure stabilité et simplifier la commande, une technique a été développée dans cette étude. Elle consiste à calculer la tension d'excitation du groupe excitatrice alternateur principal qui correspond à la tension nominale de l'alternateur en fonction de la vitesse par le modèle inverse excitatrice redresseur alternateur. Cette tension d'excitation est la référence du régulateur de la machine à aimants permanents.

Notre contribution est composée de deux boucles et deux régulateurs. La première boucle c'est pour le régulateur de la MSAP, la deuxième boucle sert à régler la tension totale. Le PSO c'est pour optimiser les paramètres des régulateurs des deux à la fois. Donc elle est plus simplifiée par rapport à la technique de trois boucles, le système rejette toutes perturbations.

L'optimisation par les algorithmes évolutionnaires de la commande des systèmes électriques, ne cesse de s'accroître et acquiert une place de plus en plus importante, spécialement l'ajustement des paramètres d'un PID qui est le meilleur exemple [76].

L'un des plus récents algorithmes évolutionnaires utilisés pour l'optimisation des paramètres du PID, est l'algorithme d'essaim de particules communément abrégé par PSO (Particle Swarm Optimization). Il est inspiré de la nature, et basé sur le déplacement d'un groupe d'oiseaux, chacun des membres du groupe se déplace avec une vitesse donnée.

Le PSO est une méthode d'optimisation itérative utilisée surtout pour les systèmes complexes c'est-à-dire composées de plusieurs blocs telle que la machine MS3E, car la détermination des paramètres de régulateur PID par les méthodes classiques directes est un peu compliquée.

La démarche suivie dans ce chapitre est la suivante : à partir de positions de problèmes présentés dans l'introduction, on va voir le comportement de MS3E en boucle ouverte et fermée et voir la méthode de régulation PSO et enfin l'interprétation des résultats avec une conclusion[77-79]

IV.3 Présentation du problème en boucle ouverte

Les trois machines tournent avec la même vitesse puisqu'elles sont montées sur le même axe. Le rôle de MSAP est de délivrer une tension nécessaire à l'alternateur principal est ceci sans apport de source électrique extérieure [80].

La tension V_{exc} , créée par l'excitatrice est redressée, pour l'excitation de la machine

principale est induit des tensions triphasées aux bornes de l'induit de l'alternateur principal, l'excitatrice a pour but de fournir de l'énergie d'excitation à travers des diodes tournantes, l'alternateur principal sans que ce dernier ne reproduise aucune énergie. Le stator de l'excitatrice est alimenté par une tension réglée qui assure la précision de tension de l'alternateur principal [81][82].

Pour une même charge, quand la vitesse de rotation augmente, pour maintenir une tension constante aux bornes de la charge, on doit diminuer la tension d'excitation V_f . Pour une même vitesse de rotation, on doit diminuer la tension d'excitation si la charge diminue. La même action est répétée si la charge croît.

Les diodes tournantes ont pour fonction de lisser le courant alternatif produit par l'excitatrice afin d'alimenter la roue polaire de l'alternateur principal en courant continu.

A la suite d'un lissage important, on doit automatiquement augmenter le nombre, de phases de l'excitatrice, car on ne peut pas utiliser les condensateurs de filtrage dans cet endroit.

L'amplitude de cette tension doit être maintenue constante pendant toute la phase. On note que la tension d'excitation de l'alternateur principal est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation, pour une tension nominale, une vitesse grande et une tension d'excitation faible.

Après la simulation de notre système en BO, on remarque qu'un problème capital se pose dans la commande de ce système. Lorsque la vitesse de rotation varie, la tension d'excitation de groupe excitatrice-alternateur principal qui correspond à la tension nominale est très faible en particulier pour les grandes vitesses, ce qui rend la commande très sensible.

Après l'exécution de la simulation de MS3E en boucle ouverte, on constate deux problèmes capitaux qui se posent dans la commande de ce système:

Dans le cas où la vitesse de rotation est grande, la tension d'excitation nominale de groupe excitatrice-alternateur principal qui correspond à la tension nominale (220V), devient faible, c'est à dire l'écart entre la tension délivrée par la machine MSAP et la tension d'excitation nominale de groupe excitatrice-alternateur principal qui correspond à la tension nominale est très importante, car la tension d'excitation est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation, ce qui rend le contrôle du système dans ce cas très difficile.

Parfois, dans le cas de vitesse faible, la tension délivrée par MSAP est insuffisante pour exciter le groupe excitatrice-alternateur principal, parce que le champ d'excitation MSAP est constant.

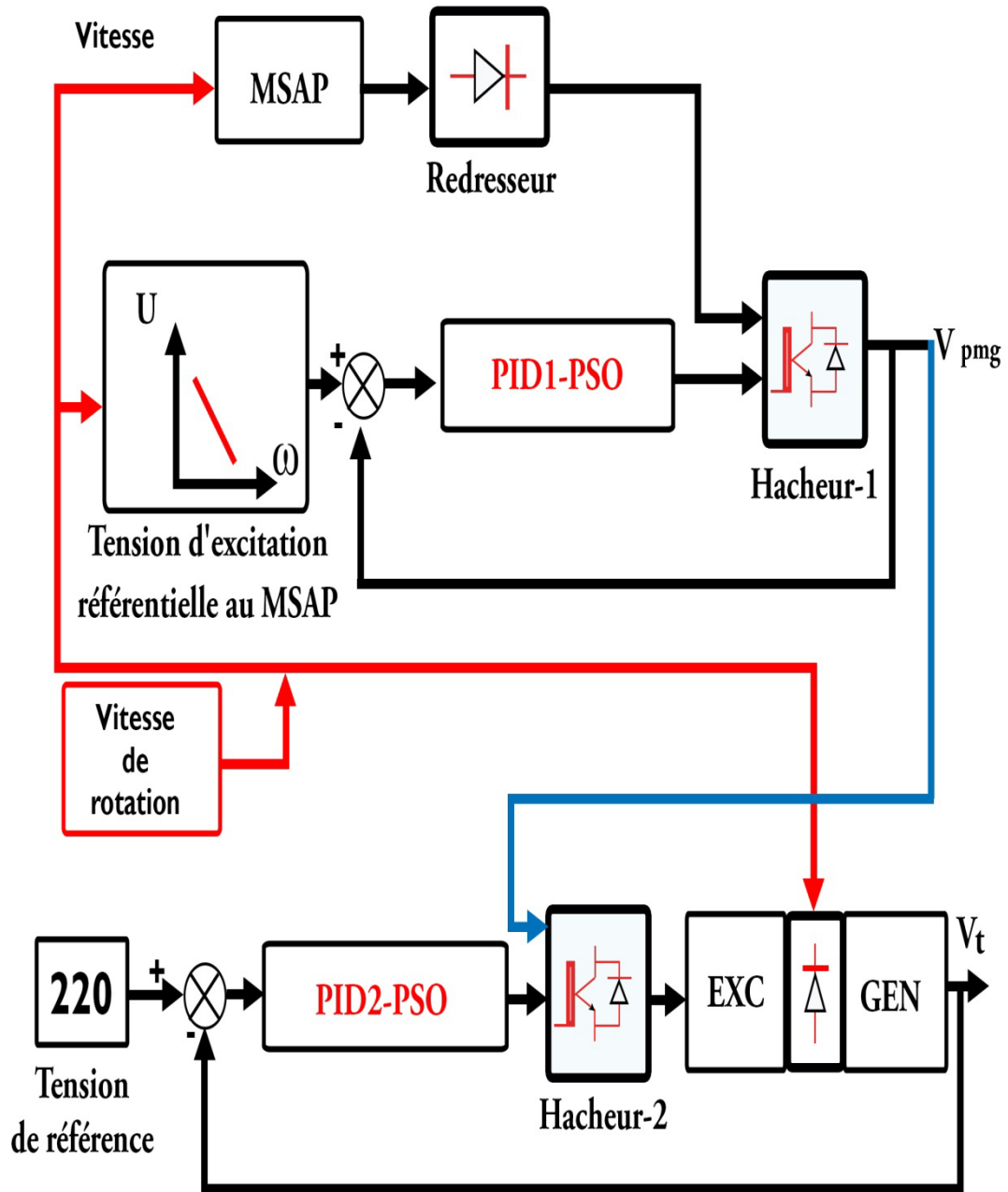
Pour remédier, on utilise la machine MSAP à vitesse lente (nombre de pôle important), qui produit une tension suffisante pour exciter le groupe excitatrice-alternateur principal, le choix de MSAP, est tributaire, du cahier de charge, l'expertise dans le domaine d'utilisation, ainsi que la compatibilité entre les machines en tension d'excitation et vitesse.

Pour commander ce système, on propose deux régulateurs, le premier pour limiter la tension de MSAP, le deuxième pour la régulation de la tension de l'alternateur principal voir figure (IV.1).

A chaque instant et pour une vitesse donnée, nous calculons la tension d'excitation de groupe excitatrice et l'alternateur principal qui correspond à la tension nominale aux bornes de MS3E, qui servira de référence pour la tension du régulateur du MSAP, c'est-à-dire que nous diminuons l'écart entre la tension délivrée par la machine MSAP et la tension d'excitation du groupe exciteur-alternateur principal qui correspond à la tension nominale aux bornes de MS3E.

Cela garantit la stabilité lorsque la machine fonctionne à grande vitesse. Pour chaque variation de vitesse ou de charge, le système s'adapte à ces changements.

On conclut le rôle de la boucle MSAP limite la surtension dans le cas de la grande vitesse, alors la boucle de l'alternateur principale régule la tension aux bornes de MS3E. L'utilisation de l'optimisation des paramètres des deux régulateurs par PSO s'avère indispensable, on doit alors optimiser les deux régulateurs à la fois, ce qui n'est pas possible pour les méthodes classiques directes.



Figure(IV.1) : Schéma de commande de générateur synchrone à excitation sans balais utilisant un contrôleur PID-PSO

IV.4 Ajustage des paramètres de régulateurs PID par la méthode Ziegler Nichols

IV.4.1 Méthode directe

La méthode de Ziegler Nichols est basée sur la réponse du système en boucle ouverte, caractérisée à partir des paramètres tels que la constante de temps L_z , temps de retard et la constante de temps T_z . Ces données expérimentales permettent la détermination des paramètres de régulateur voir Tableau (IV.1).

La réponse de notre système est une équation du premier ordre par nature stable. La détermination des paramètres du contrôleur par les méthodes Ziegler Nichols ZN, pour une vitesse donnée, est abordable. Cependant, dans le cas de deux régulateurs, les paramètres adaptés aux variations de vitesse et de charge sont difficiles à déterminer, car la méthode basée sur Ziegler Nichols est utilisée pour ajuster un seul régulateur.

Les paramètres du second contrôleur sont très difficiles à calculer, car ils ont été déterminés par tâtonnement et le second par la méthode ZN.

A noter que le tableau présente les équations de ZN pour le cas de la boucle ouverte, à partir de la réponse du système en BO et avec des calculs simples, on détermine les paramètres de régulateur PID.

$$K_{ZN} = [K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}] = [2.08, 0.1664, 0.0486, 0.12, 1.22, 3.04].$$

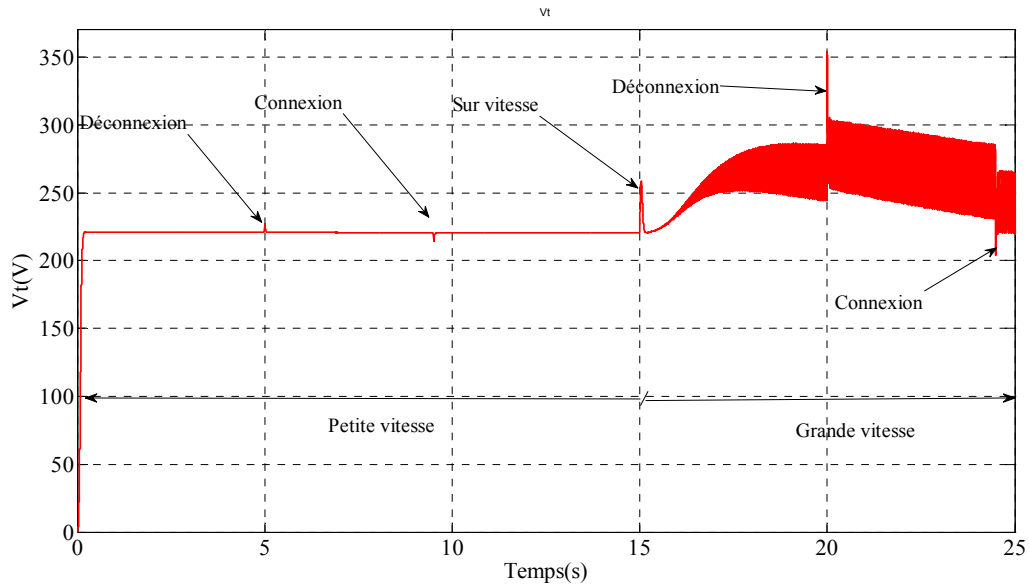
Les paramètres K_{p1} , K_{i1} et K_{d1} sont déterminés par la méthode de Ziegler Nichols voir Tableau(IV.1), tandis que K_{p2} , K_{i2} et K_{d2} sont déterminés par tâtonnement..

Les résultats de la simulation sont illustrés par la figure(IV.2) et figure(IV.3). Ils révèlent le comportement de la tension V_t de l'alternateur principal pour une charge inductive de $\cos\varphi = 0.8$. Le temps de réponse de l'alternateur principal devient plus rapide et prend moins de 0,2 s, son fonctionnement est stable.

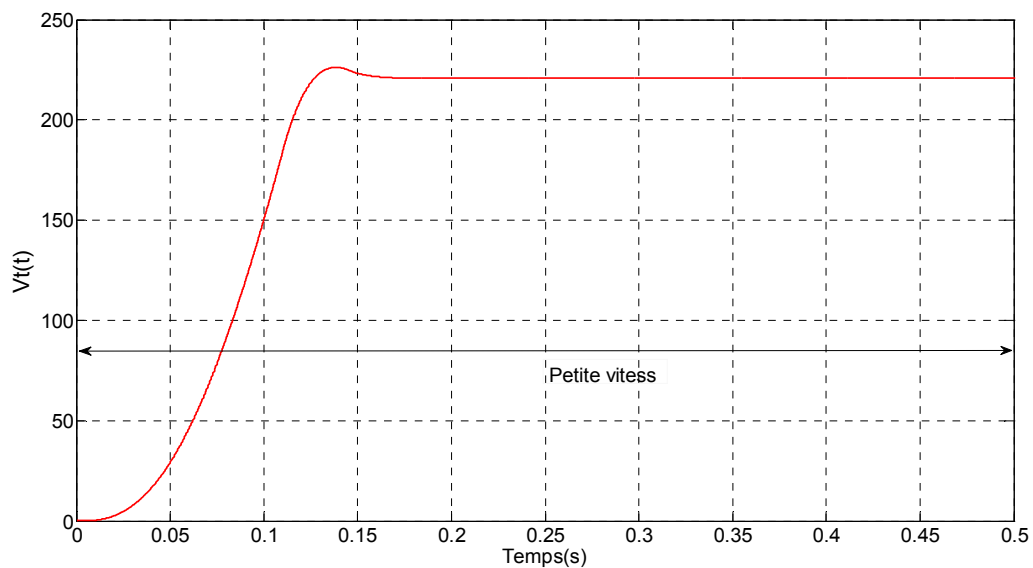
On remarque des perturbations importantes dans la région à grande vitesse en raison des valeurs incorrectes des paramètres du deuxième régulateur, La détermination des paramètres de plusieurs régulateurs par une technique autre que PSO, s'avère très utile[83].

Tableau (IV.1) : Ziegler-Nichols pour les paramètres de réglage en boucle ouverte

Controller	K_{p1}	$T_{i1} = K_{p1}/K_{i1}$	$T_{d1} = K_{d1}/K_p$
P	T_z/L_z	-	0
PI	$0.9(T_z/L_z)$	$L_z/0.3$	0
PID	$1.2(T_z/L_z)$	$2L_z$	$0.5L_z$



Figure(IV.2) : Variation de tension de l'alternateur principal pour une charge inductive $\cos\varphi = 0.8$ en utilisant la méthode de Ziegler Nichols

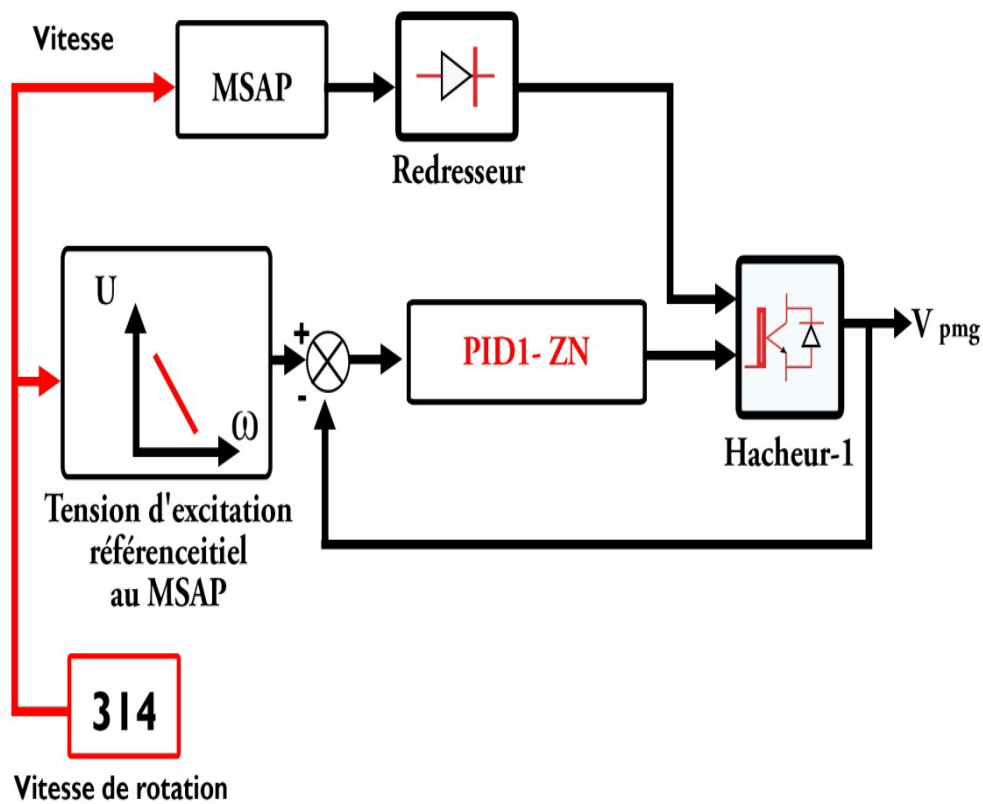


Figure(IV.3) : Zoom de la figure(IV.2) entre 0 et 0,5 s.

IV.4.2 Méthode de superposition

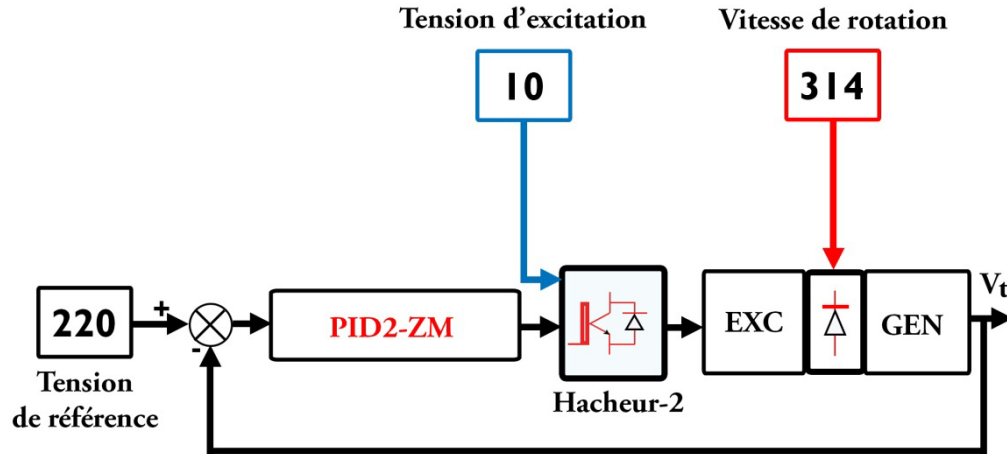
Puisque notre système vérifie le principe de la proportionnalité, donc on peut appliquer la méthode de la superposition, qui consiste à superposer les réponses de chacun des sous-systèmes pour avoir la réponse du système complet. Afin de l'effectuer, on a séparé notre schéma de commande en deux parties.

La figure (IV.4) représente la partie de la régulation de tension à la sortie de MSAP, à partir de la tension en boucle ouverte, on peut déterminer les paramètres de régulateur PID en utilisant la méthode ZN voir Tableau (IV.1).



Figure(IV.4) : Schéma de commande de machine synchrone à aimant permanent

La figure (IV.5) représente le schéma de commande de l'alternateur principal excitatrice. On remarque qu'il y a deux perturbations, la vitesse de rotation et la tension de MSAP (sa vitesse nominale est 314rd/sec, tension nominale $V_{msap}=220V$) même étape que le cas précédent, on a calculé les paramètres de ce régulateur.



Figure(IV.5) : Schéma de commande de l'excitatrice alternateur principal

Les valeurs numériques de deux régulateurs déterminées par la méthode ZN superposition sont: $K_{ZN} = [K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}] = [0.96, 1, 0.275, 0.0266, 0.9, 1.22]$, on remarque que le système est totalement instable figure(IV.6), une autre technique développée pour la détermination des paramètres de plusieurs régulateurs avec plusieurs perturbations s'avère très utile.

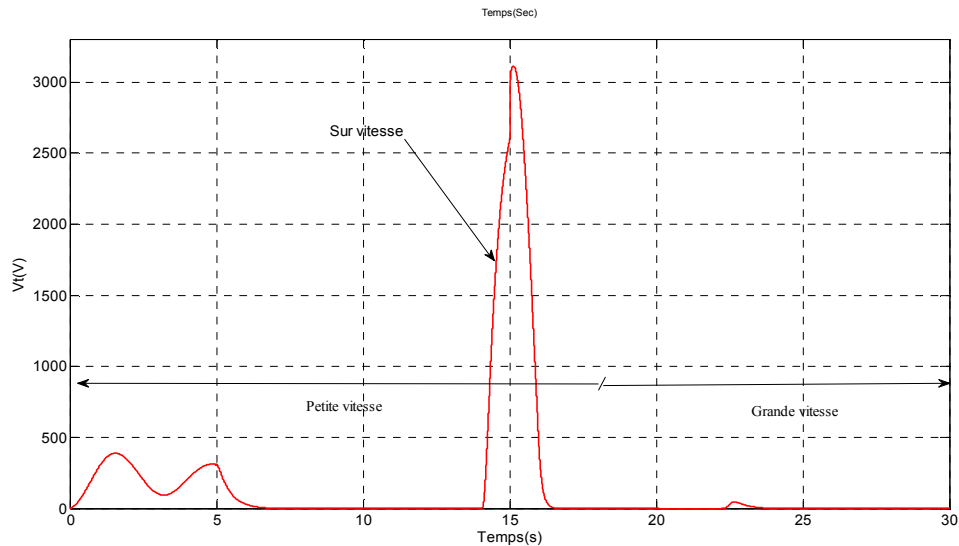


Figure (IV.6) :Variation de la tension de l'alternateur principal pour une charge inductive: $\cos\phi = 0.8$ en utilisant la méthode de Ziegler Nichols superposition

IV.5 Résultats de Simulation et Discussion

Dans le but de tester l'algorithme de l'optimisation, les paramètres de régulateur PID déterminés par le PSO, des schémas programme ont été réalisés sous Simulink-Matlab les trois machines synchrones fonctionnant en générateur sont interconnectées mécaniquement entre elles, et possèdent par conséquent la même vitesse de rotation imposée.

Les résultats des courbes de simulation sont illustrés par la figure (IV.7). Ils révèlent le comportement de la tension V_t de l'alternateur principal pour une charge inductive de $\cos(\varphi)=0.8$.

Lorsque la vitesse d'entraînement atteint 314 rad/s pour une charge inductive $\cos\varphi = 0,8$, le temps de réponse de l'alternateur principal est plus rapide et prend moins de 0,2s. Son fonctionnement est stable, comme illustré par la Figure (IV.7).

Lorsqu'une charge est appliquée aux bornes de l'alternateur principal, l'amplitude de la tension suit la référence dans les deux cas correspondant à la connexion et déconnexion de la charge nominale. On peut noter que l'effet de la variation de la charge est parfaitement amorti et que le système, dans ce cas, rejette toutes les perturbations.

Dans la même configuration, lorsque la vitesse d'entraînement atteint 3140 rad/s, nous observons un pic de tension à la 15 seconde, causé par la variation de vitesse de 314 rad/s à 3140 rad /s, comme illustré par les figures (IV.7) a, b, c.

La durée du pic est inférieure à 0,2s et la tension stable et son amplitude inférieure à 20% de celle nominale.

Les résultats des courbes de simulation sont illustrés par les figures (IV.4), le comportement de la tension V_t à un changement de niveau de la valeur de référence de l'amplitude avec une vitesse de rotation fixée est égale à 1500tr/mn. On remarque que la croissance de la valeur de référence de l'amplitude provoque la croissance des courants d'excitation de l'excitatrice et de la machine principale, dans le but de maintenir l'amplitude de la tension V_t à la valeur de la référence. Pour cette raison on propose un contrôle de la tension de MSAP en utilisant un redresseur contrôlé pour maintenir la tension à la valeur de référence.

Dans la même configuration, lorsque la vitesse d'entraînement atteint 3140 rad/s, nous observons un pic de tension à la 15^e seconde, causé par la variation de la vitesse de 314 rad/s à 3140 rad/s, comme illustré par les figures (IV.7) a, b, c. La durée du pic est inférieure à 0,2 s, la tension est stable et l'amplitude inférieure à 20% de celle nominale.

A la vitesse élevée de 3140 rad/s, illustrée par la figure (4.8), lorsqu'une charge est appliquée aux bornes de l'alternateur principal, dans ces cas de connexion et déconnexion, on remarque que l'amplitude de la tension suit la référence et l'effet de variation de la charge est parfaitement amorti.

En cas de vitesse élevée, le pic de la tension, aux 20^e et 25^e secondes, est plus importante mais acceptable (moins de 20%) et le temps de stabilité est également acceptable, ce qui justifie la robustesse de la technique de contrôle.

Le tableau (IV.2) indique les paramètres PSO utilisés pour vérifier les performances du contrôleur PSO-PID en ce qui concerne la recherche des paramètres du contrôleur PID[84]. Le facteur de pondération d'inertie est défini par:

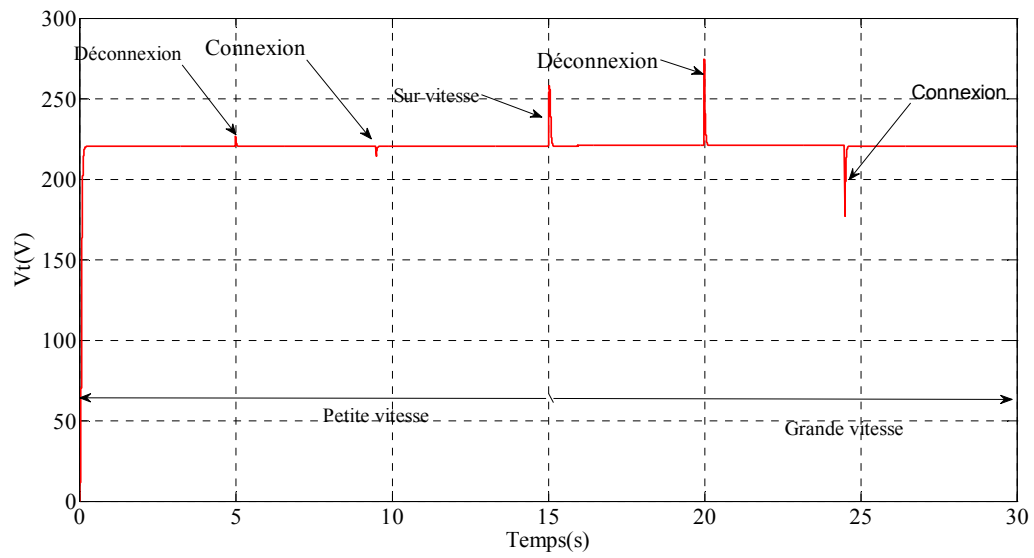
$$\omega = \omega_{\max} - ((\omega_{\max} - \omega_{\min}) / i \text{ (iter}_{\max}) \text{ iter})$$

Où $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$, $i \text{ (iter}_{\max})$ est le nombre maximum d'itérations iter est le nombre actuel d'itérations[85-87]. Pour ces paramètres, le résultat de la simulation indiquant la meilleure solution correspond aux paramètres PID indiqués ci-après:

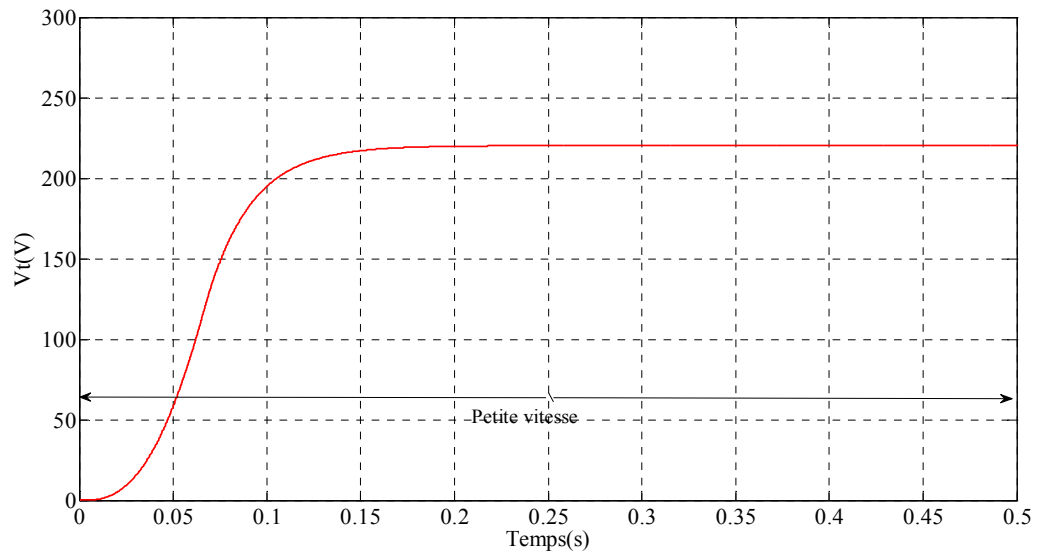
$$K_{\text{opt}} = [K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}] = [99, 96, 1.956, 2.407, 100, 0.201, 63.86]$$

Tableau (IV.2) : Les paramètres de PSO utilisés en simulation

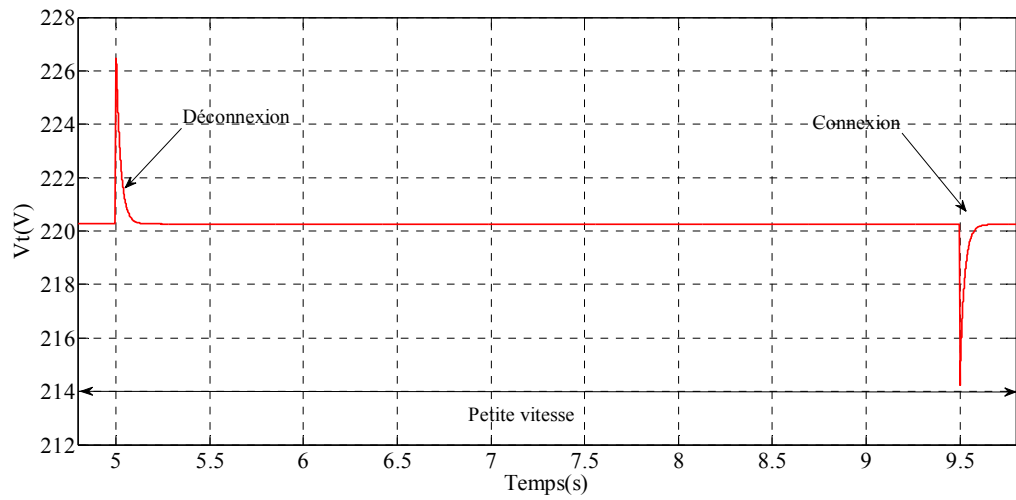
Parameters	Valeur
α	10
β	4
Population:n	50
C_1	2
C_2	2



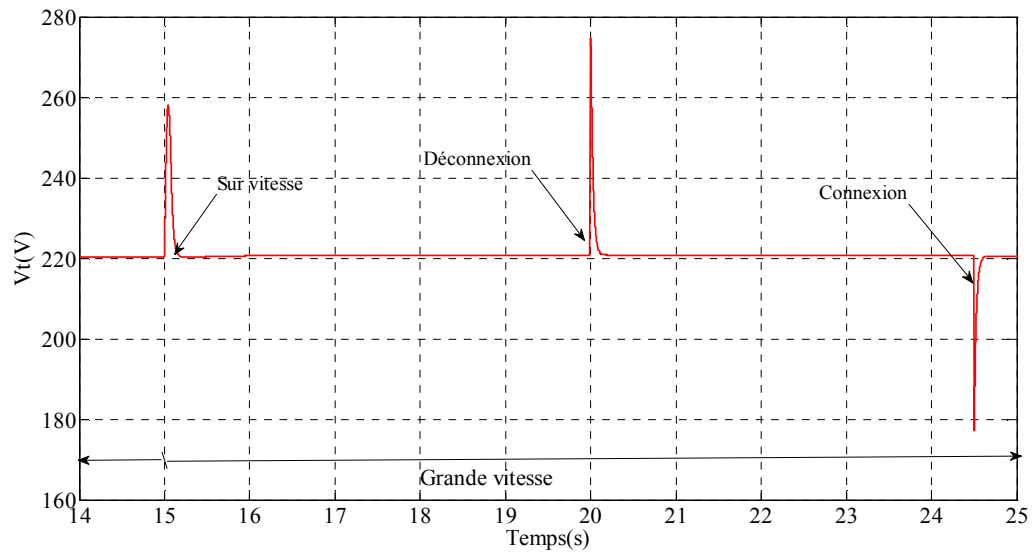
Figure(IV.7) :Variation de tension de l'alternateur principal avec une charge inductive:
 $\cos\varphi = 0.8$



(a) Zoom de la figure(IV.7) entre 0 et 0,5 s.



(b) Zoom de la figure(IV.7) entre 4 et 10 s.



(c) Zoom de la figure(IV.7) entre 10 et 25 s.

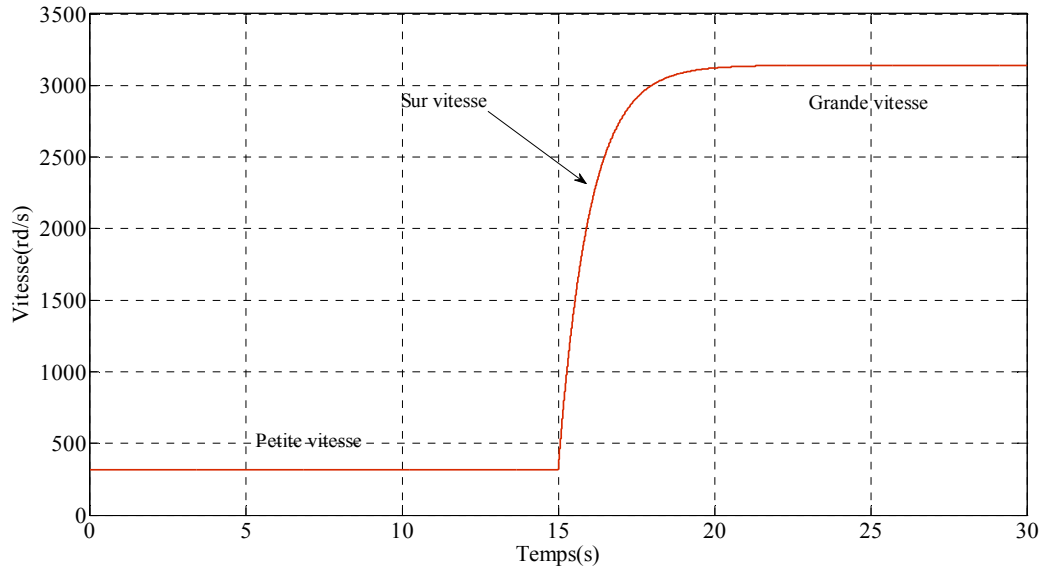


Figure (IV.8) : Variation de la vitesse d'entraînement du générateur synchrone à excitation sans balais GS3E

IV.6 Etude de robustesse

Le contrôle de la robustesse est validé par la variation des paramètres qui sont justifiés lorsque la machine fonctionne à grande vitesse du fait du courant de Foucault et des effets de température sont importants.

Afin d'illustrer la robustesse du contrôle proposé, nous étudions l'effet de la variation des paramètres de l'alternateur principal sur les performances du réglage de la tension.

La variation introduite dans le test concerne dans la pratique, les conditions réelles telles que la surchauffe, la saturation du circuit magnétique et les conditions de fonctionnement telles que la variation de la vitesse et de la charge.

Trois cas sont considérés:

1. Variation de la résistance du stator de 50%;
2. Variation de la résistance du rotor de 50%;
3. Démarrage avec une vitesse réduite de 100 rad/s;

Pour illustrer les performances de réglage, nous avons simulé la variation de la résistance du stator et du rotor de 50% par rapport aux valeurs nominales, avec un pas de tension de 220 Volt. Les figures (IV.9) et (IV.10) illustrent les résultats des tests qui révèlent que la technique proposée est insensible aux variations de résistances du rotor ou du stator de la machine. Par conséquent, même avec de paramètres mal déterminés, la

technique de contrôle adoptée résiste et reste stable.

Pour le troisième cas simulé, à vitesse réduite (100 rad/s) avec application d'une charge nominale, le système est toujours insensible à cette vitesse, comme illustré par la figure (IV.11).

Le système de contrôle assure le rejet des perturbations dans les trois cas considérés (les constantes de temps du système sont supérieures à celles de la machine).

La technique de contrôle proposée dans le présent document est robuste, simple et présente l'avantage d'être facilement mise en œuvre.

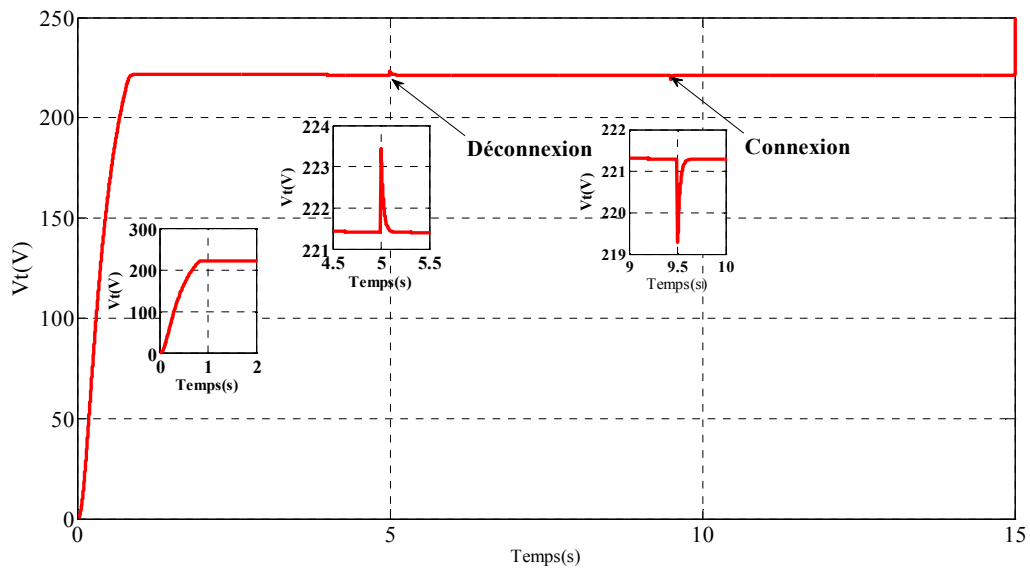


Figure (IV.9) : Test de robustes pour le démarrage à faible vitesse de 100 rad/s

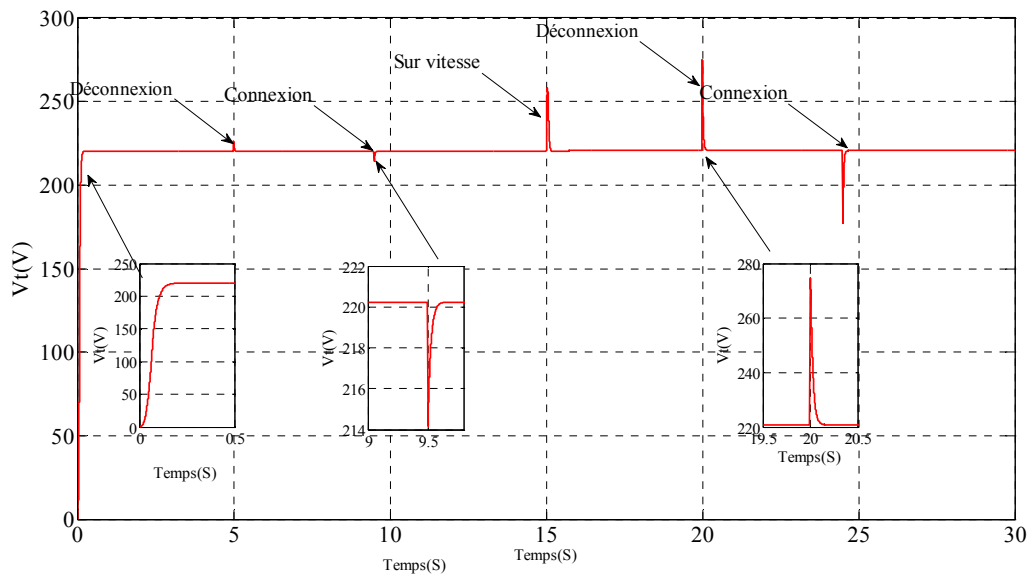
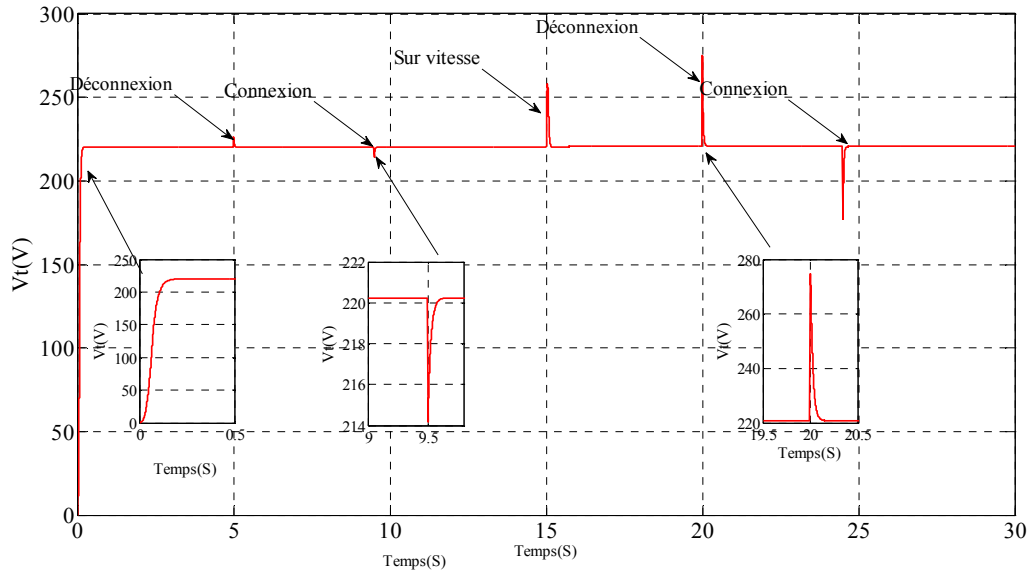


Figure (IV.10) : Test de robustesse pour une variation de la résistance du stator (R_s) augmentation de 50% de R_s



Figure(IV.11) :Test de robustesse pour une variation de la résistance du stator (R_r) augmentation de 50 % de R_r

IV.7 Conclusion

Dans ce travail, l'algorithme de l'optimisation de contrôle d'amplitude de la tension de la machine synchrone à trois étages par PSO a été testé sous simulink-matlab.

Pour une vitesse constante la machine synchrone à trois étages est très utilisée dans les centrales électriques, le rôle de la machine synchrone à aimants permanents est d'avoir une tension au démarrage, pour des vitesses variables la machine utilisée dans le domaine de l'aéronautique et l'énergie renouvelable.

Dans ces applications, la machine synchrone à trois étages est directement entraînée, le système de régulation mécanique de vitesse est automatiquement supprimé, les dimensions et la masse des générateurs sont considérablement réduits.

Les résultats des courbes ont montré qu'en contrôlant le courant d'excitation I_{exc} qui est le seul paramètre physique accessible, la tension de la machine principale est maintenue à sa valeur de référence malgré les variations de charge et de vitesse.

L'optimisation des paramètres du régulateur par PSO sont très bénéfiques pour les systèmes complexes tels que la machine synchrone à trois étages, les performances obtenues pour le contrôle de l'amplitude de la tension sont satisfaisantes et sont assez similaires aux résultats obtenus par d'autres techniques, pour en citer qu'un récent exemple, la méthode à trois boucles[76], comme, il a été précisé et décrit dans l'introduction ci-dessus.

A première vue, et par analogie, l'implantation pratique de notre technique est plus facile pour la réalisation expérimentale que celle de la méthode à trois boucles.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Bilan du travail

Dans cette thèse, nous avons centré notre travail sur l'alternateur synchrone à trois étages avec ponts à diodes tournants, en vue de sa commande à vitesse variable et constante. Pour l'analyse des performances de l'asservissement de la tension de la machine, un modèle mathématique a été élaboré sous matlab/simulink. Cette machine est composée d'un alternateur synchrone triphasé de deux pôles, d'une excitatrice à ponts de diodes tournants et d'une machine synchrone à aimant permanent MSAP.

L'alternateur principal, qui a un rotor à pôles lisses, est modélisé dans le domaine de la transformée de Park dq. L'excitatrice c'est tu une machine synchrone à structure inversée également est modélisée de la même façon que l'alternateur principal et la même procédure a été appliquée aussi bien pour le modèle de la MSAP que celui des ponts à diodes tournants. Les trois machines sont reliées au même arbre et, par conséquent, ont la même vitesse de rotation.

Nous avons supposé que le moteur d'entraînement est une source de vitesse et que le niveau de la charge consommée n'a pas d'influence sur la vitesse de rotation. Elle a été considérée comme une entrée de perturbation, ce qui n'est pas le cas pour une éolienne, où la puissance électrique active, influe fortement sur la vitesse de rotation.

Il est à noter que la machine synchrone à aimant permanent MSAP contrôle la tension de sortie de l'alternateur principal à travers un régulateur PID.

L'avantage principal de l'alternateur synchrone à trois étages est l'absence de balais ce qui constitue leur fiabilité et robustesse. Cette machine est très utilisée dans les centrales électriques à grande puissance pour la vitesse d'entraînement constante ; pour ce qui est de la vitesse d'entraînement variable, elle est utilisée dans la production d'énergie embarquée et les groupes électrogènes de type 'inverter' : ce qui a constitué notre motivation première pour ce travail.

Le modèle de simulation de notre alternateur a été exécuté sous l'effet de plusieurs perturbations exerçant une influence notable sur sa non-linéarité, l'évolution de son comportement avec les variations de la vitesse et la connexion/déconnexion de la charge. En premier lieu, les paramètres du régulateur PID on été déterminés par la méthode Ziegler Nichols.

Après la simulation, on a remarqué que la tension de sortie de l'alternateur principal est stable pour la vitesse basse, avec connexion/déconnexion de la charge. Le système a rejeté les deux perturbations mais, pour les grandes vitesses, on a remarqué une divergence de la tension sous l'effet de perturbation de la vitesse et de la charge. Cette divergence dans la grande vitesse est causée par la surtension de MSAP, car la tension de sortie de la machine est fonction de la vitesse. Pour limiter cette surtension, on a introduit un deuxième régulateur ayant comme consigne une tension en fonction de la vitesse de rotation et dans le cas des grandes vitesses, le régulateur agit sur la tension de sortie du MSAP.

Le deuxième problème, c'est la détermination des paramètres du second régulateur, parce que, en général, les méthodes classiques sont utilisées dans le cas d'un seul régulateur, l'introduction d'une nouvelle méthode est devenue inévitable.

Pour la détermination et l'optimisation des paramètres de ces deux régulateurs à la fois, nous avons choisi la technique d'intelligence artificielle PSO fondée sur un modèle du système à commander, à cause de nombreux avantages par rapport aux techniques, tel que, le temps de calcul qui est relativement court.

Dans notre cas, nous avons choisi un critère d'optimisation qui a pris en considération les trois paramètres du signal de tension de sortie de l'alternateur, qui sont : le dépassement maximal du changement de tension, le temps de réponse et la dérivée maximale de la tension. Les paramètres des deux régulateurs PID-PSO ont été optimisés à la fois. Nous avons minimisé la fonction objective F , après la détermination de ces paramètres. Par conséquent, le système avait rejeté toute perturbation, telle que, la variation de la vitesse et de la charge, suivant la consigne avec un temps de réponse très court.

Contribution et résultats

Notre contribution dans ce travail est sous la forme d'une amélioration et une simplification de la structure du régulateur de tension de l'alternateur synchrone à trois étages pour des vitesses variable et constante. Un temps de réponse et une stabilité sont remarquables. Par conséquent, nous avons pu simplifier la méthode de régulation, ce qui a rendu sa réalisation pratique facile, avec un rejet des perturbations liées aux variations de vitesse et de la charge.

Perspectives

Les performances dynamiques obtenues par les deux régulateurs PID-PSO, pour l'alternateur à trois étages avec des vitesses variable et constante, étaient très satisfaisantes. Les perturbations sont rejetées dans un temps de réponse très court, ce qui justifie que le système possède une robustesse et une stabilité très remarquées. Cependant, notre travail peut être amélioré, de ce fait, nous proposons quelques perspectives pour des travaux futurs:

- L'alternateur synchrone à trois étages, malgré son avantage, telle que la robustesse, sa complexité rend son utilisation coûteuse. La généralisation de la commande, pour d'autres types de machines, est devenue indispensable, par exemple l'alternateur synchrone à double excitation.
- L'alternateur à vitesse d'entraînement variable et constante avec régulateur constitue une nouvelle structure innovante, de ce fait, l'application de ces résultats pour le groupe électrogène à vitesse variable sera très utile.
- Les alternateurs à trois étages seront bénéfiques aussi bien pour une moyenne que pour une grande puissance, telles que les centrales électriques et la production d'énergie embarquée. Mais, pour les puissances faibles, la MSAP sera très souhaitée. De plus, l'étude de cette machine avec une régulation pour des vitesses variable et constante sera très utile, surtout pour l'efficacité énergétique des groupes électrogènes dits 'inverter'.
- L'intégration dans le programme d'un capteur de vitesse basée sur l'estimation ou l'observation est souhaitée et, enfin, la réalisation expérimentale d'un nouveau régulateur en temps réel dans l'environnement Dspace sera très utile.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1]. Mm.Gérard Cornu, Jean-Luc Fichet, Hervé Maurey et Rémy Pointereau. "Rapport d'information n° 463 (2013-2014)", fait au nom de la commission du développement durable, Sénat le 16 Avril 2014.
- [2]. Hydro-Quebec en bref, octobre 2014, (<http://www.hydroquebec.com/apropos-hydro-quebec/qui-sommes-nous/hydro-quebec-bref.html>).
- [3]. Scordia J., Desbois-Renaudin M., Trigui R., Jeanneret B., Badin F., 2005. "Global optimization of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming"-International Journal of Vehicle Design.DOI 10.1109/PESMG.2013.6672704.
- [4]. Dhiya Ali Al-Nimma, Dr. Majid Salim Matti, "Reactive Power Control of an Alternator with Static Excitation System Connected to a Network", Mosul University, Vol.18, N°3, June 2010.
- [5]. N. Patinthese de doctoral école supérieur de cachan, "Analyse d'architectures modélisation et commande de génératrice pour réseau autonome"
- [6]. T. Zouaghi, M. Poloujadoff, "Modeling of Polyphase Brushless Exciter Behavior for Failing Diode Operation", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3, September 1998.
- [7]. T. Figiel, J. Bothwell W. Moore, "Preventive Maintenance and Overhaul Experience for Rotating Brushless Exciters and other Excitation Systems," Presented at EPRI Utility Generator Predictive Maintenance and Refurbishment Conference Phoenix, Arizona, December 3, 1998.
- [8]. DCG-EMTP (Development coordination group of EMTP) Version EMTP-RV 2.6, Electromagnetic Transients Program Available: <http://www.emtp.com>.
- [9]. Jonas Kristiansen Noland, Erick Fernando Alves, AtilaPardini, Urban Lundin "Unified Reduced Model for a Dual Control Scheme of the High-Speed Response Brushless Excitation System of Synchronous Generators". IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI:10.1109/TIE.2019.2931270.
- [10]. Kai Xiong, Yunhua Li, Yun-Ze Li, Ji-Xiang Wang "Excitation current calculation of a brushless synchronous generator under different speed and load" 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), DOI:10.1109/ICARCV.2018.8581373.

- [11]. J. Mahseredjian, J. L. Naredo, U. Karaagac, J. A. Martinez–Velasco, “Off-line Simulation Methods and Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges”, IEEE/PES Tutorial on Electromagnetic Transients in Power Systems, IEEE Catalog Nr. 11TP255E, ISBN 978-1-4577-1501-3, July 2010.
- [12]. S. Jordan, J. Apsley. “Open-Circuit Fault Analysis of Diode Rectified Multiphase Synchronous Generators for DC Aircraft Power Systems”. IEEE International, Electric Machines & Drives Conférence (IEMDC), pp. 926 - 932, 2013.
- [13]. A.EL-AKOUM. “Étude de faisabilité de la Modélisation Electrique des Excitatrices à Diodes Tournantes des Paliers” CP0/CP1 sous EMTP-RV, 2011.
- [14]. U. Karaagac, H. Gras, J. Mahseredjian, A.El-Akoum and X. Legrand, "Synchronous Machine Exciter Circuit Model in a Simultaneous Field Winding Interface," Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE , DOI:10.1109/PESMG.2013.6672704
- [15]. [Xinsheng Lai, MingyiZhang , " An efficient ensemble of GA and PSO for real function optimization " Published in: 2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology DOI: 10.1109/ICCSIT.2009.5234780.
- [16]. Energy History.[Online].Available:
http://www.fas.harvard.edu/~histecon/energyhistory/publications_energy.html. [Accessed: 31-Mar-2017].
- [17]. La consommation d'électricité en chiffres, EDF France, 20-Jul-2015. [Online]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l'energie-le-developpement-durable-la-consommation-d'electricite-en-chiffres>. [Accessed: 19-Jun-2017].
- [18]. [3] M. Marty, D. Dixneuf, and D. Garcia Gilabert, Principes d'électrotechnique, Dunod. 2005.
- [19]. G. Borvon, Histoire de l'électricité: de l'ambre à l'électron. Vuibert, 2009.
- [20]. Ivan Kravtsoff; Philippe Dessante; Jean-Claude Vannier; Philippe Manfè, “Obal optimization of hybrid electrical system to decrease fuel consumption or operating cost”, Published in: 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications.
- [21]. Matt Greig, Jiacheng Wang “Fuel consumption minimization of variable-speed wound rotor diesel generators” IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217506
- [22]. Ik-Chan Choi, Yoon-Cheul Jeung, Dong-Choon Lee “Variable speed control of

- diesel engine-generator using sliding mode control” 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), DOI: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080955.
- [23]. A.Malozemov, V. S. Kukis, A. V. Naumov “Hybrid Power System with Variable Speed Diesel Engine” 2018 International Ural Conference on Green Energy (Ural Con), DOI:10.1109/URALCON.2018.8544335.
- [24]. Hamid BEN AHMED, Bernard MULTON, Gilles FELD, Nicolas BERNARD, “Machines synchrones - Modélisation en régime permanent”, Technique de l'ingénieur, 2006.
- [25]. [http://www.techniques-ingenieur.fr//Convertisseurs et machines électriques](http://www.techniques-ingenieur.fr//Convertisseurs%20et%20machines%20électriques).
- [26]. P. Marty, “Commutateurs de courant”, Cours électronique de puissance, la conversion DC-AC et AC-DC, ENSEEIHT 1992
- [27]. W. Koczara, L. Grzesiak, M. da Ponte “Novel hybrid Load-Adaptive Variable-Speed Generating Set”, Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'98, Pretoria, South Africa, pp 271-276.
- [28]. L. Grzesiak , W. Koczara, M. da Ponte “Application of a permanent magnet machine in the novel hygen adjustable speed load adaptive electricity generating system”, Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99, 9-12 May 1999 Page(s): 398 – 400.
- [29]. W. Koczara, L. Grzesiak, M. da Ponte “Hybrid Load Adaptive Variable-Speed Generating Set: New System Topology and Control Strategy”, Proceedings of International Conference on Power Generation, Powergen, Orlando, Florida 7-9 December 1998, USA.
- [30]. W. Koczara, J. Leonarski, R. Dziuba “Variable Speed Three Phase Power Generation Set”, EPE 2001, Graz 27-29 August, Austria.
- [31]. B. Tounsi, S. Astier “Comparative study of power electronics converters associated to variable speed permanent magnet alternator”, Speed am 2006, Taormina 23-26 May, Italy.
- [32]. B. Tounsi, S. Astier “Comparative Study of Power Electronics Converters Associated to Variable Speed Permanent Magnet Alternator in Automotive” PCIM 2006, Nuremberg 30-1 May/June, Germany.
- [33]. Working Group on Prime and Energy Supply, "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies ". 1992 IEEE Tran. Power System.

- [34]. Haj Agos L. M., Basler, M. J. "Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies". Changes to IEEE 421.5 Power Engineering Society General Meeting 2005 IEEE.
- [35]. K. Kurihara, “Effects of Damper Bars on Steady-State and Transient Performance of Interior Permanent-Magnet Synchronous Generators”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 42-49, Jan. 2013.
- [36]. M. Clementfilleau, “Mise en place d'une méthodologie de modélisation en vue du diagnostic des défauts électriques des alternateurs”, Thèse Doctorat de Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) soutenue 13 octobre 2017.
- [37]. Michael Faraday, *Wikipédia*. 09-May-2017.
- [38]. Méthodes de Runge-Kutta, *Wikipédia*. 09-Mar-2017.
- [39]. Guy Séguier, Philippe Delarue, Francis Labrique; «Electronique de puissance structure de commande et application»; DUNOD 2015.
- [40]. R. R. Saldanha, “ Optimisation en Electromagnétisme par application conjointe des Méthodes de Programmation Non linéaire et de la Méthode des Eléments Finis ”, PhD thesis, Grenoble, INPG, 1992.
- [41]. J. A. Vasconcelos, “ Optimisation de forme des structures électromagnétiques ” PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, 1994.
- [42]. C.W. Carroll, “The created response surface technique for optimizing nonlinear, restrained systems” *Operations Research*, vol. 9, no. 2, pp. 169–184, 1961.
- [43]. R. T. Rockafellar, “A dual approach to solving nonlinear programming problems by unconstrained optimization,” *Mathematical Programming*, vol. 5, no. 1, pp. 354–373, 1973.
- [44]. K. Svanberg, “The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization” *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 359–373, 1987.
- [45]. J. Culioli, “Introduction à l’optimisation, editor: ellipses,” ISBN : 2729894284, 1994.
- [46]. N. Z. Shor, “Cut-off method with space extension in convex programming problems,” *Cybernetics and systems analysis*, vol. 13, no. 1, pp. 94–96, 1977.
- [47]. S.-P. Han, “A globally convergent method for nonlinear programming,” *Journal of optimization theory and applications*, vol. 22, no. 3, pp. 297–309, 1977.
- [48]. H.-P. P. Schwefel, “Evolution and optimum seeking: the sixth generation”, John

- Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [49]. R.P.Brent, “Algorithms for minimization without derivatives”, Courier Dover Publications, 2013.
 - [50]. R. Fletcher, “Practical methods of optimization” John Wiley & Sons, 2013.
 - [51]. Y. Cherruault, “Optimisation : méthodes locales et globales ” Presses Universitaires de France-PUF, 1999.
 - [52]. J.A. Nelder and R. Mead, “A simplex method for function minimization ” Computer journal, vol.7, no.4, pp.308–313, 1965.
 - [53]. S. Kirkpatrick, M. Vecchi, et al., “Optimization by simulated annealing,” science, vol.220, no.4598, pp.671–680, 1983.
 - [54]. S. Kirkpatrick, “Optimization by simulated annealing Quantitative studies,” Journal of statistical physics, vol.34, no.5-6, pp.975–986, 1984.
 - [55]. F. Glover and M. Laguna, Tabu search. Springer, 1999.
 - [56]. P. Rocca, M. Benedetti, M. Donelli, D. Franceschini, and A. Massa, “Evolutionary optimization as applied to inverse scattering problems,” Inverse Problems, vol. 25, no. 12, 2009.
 - [57]. J. Holland, “adaptation in natural and artificial systems”, university of michigan press, ann arbor, 1975.
 - [58]. K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, “Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization,” Natural computing, vol.1, no.2-3, pp.235– 306, 2002.
 - [59]. M. Dorigo and L.M. Gambardella, “Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem,” Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, vol.1, no.1, pp.53–66, 1997.
 - [60]. Reynolds, C.W. Flocks, herds and schools, “a distributed behavioral model”, Computer Graphics, 21(4), 25-34, 1987.
 - [61]. Heppner, F. and Grenander, U.A “stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks”, In S. Krasner, Ed., The Ubiquity of Chaos. AAAS Publications, Washington, DC, 233-238, 1990.
 - [62]. Wilson, E.O. “Sociobiology: The new synthesis”, Cambridge, MA: Belknap Press, 1975.
 - [63]. Kennedy, J., and Eberhart, R. C. “Particle swarm optimization” IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway,

- NJ, IV, 1942-1948, 1995.
- [64]. Kennedy J. & Eberhart R.C. Swarm Intelligence. Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- [65]. Eberhart R.C. & Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. International Congress on Evolutionary Computation, San Diego, California, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 8488, 2000.
- [66]. Shi, Y, and Eberhart, R.C. A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Press, 69-7, 1998.
- [67]. MUKHERJEE, V.andGHOSHAL, S.P. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System Electric Power Systems Research. vol. 77, iss.12, pp.1689–1698, 2007.
- [68]. NABAVI-KERIZI, SH. ABADI, M. and KABIR, E. A PSO-based Weighting Method for Linear Combination of Neural Networks, Computers and Electrical Engineering, vol. 94, No. 5, pp. 36-886,2010.
- [69]. BEDI, P. BANSAL, R. and SEHGAL, P. Using PSO in a Spatial Domain based Image Hiding Scheme with Distortion Tolerance, Computers and Electrical Engineering, vol. 39, No.2, 2013.
- [70]. CARDENAS, R. CLARE, and J. WHEELER.P. 4-Leg Matrix Converter Interface for à Variable-Speed Diesel Generation System.In: *38th Annual Conference on Industrial Electronics Society (IECON)*.Montreal: IEEE, 2012, pp. 6044.
- [71]. WANG, D.H. NAYAR, C.V. and WANG,C. Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator. In: *2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*.Hefei: IEEE, 2010, pp. 1-6.ISBN: 978-
- [72]. PATIN, N. VIDO, L. MONMASSON, E. LOUIS, J-P. GABSI, M. and LÉCRIVAIN, M. Control of a Hybrid Excitation Synchronous Generator for Aircraft Applications. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*.2008, vol. 55, iss. 10, pp. 3772-3783.ISSN: 0278-0046.
- [73]. BAYRAM, T. and STEPHAN, A. Comparative Study of Power Electronics Converters Associated to Variable Speed Permanent Magnet Alternator. In: *International Symposium on Power Electronics Electrical Drives, Automation and Motion*. 10.1109/SPEEDAM.2006.1649974 IEEE.

- [74]. KRAVTZOFF, I. DESSANTE, P. VANNIER, J.C. MANFE, and P. MOUNI, E. Global Optimization of Hybrid Electrical System to Decrease Fuel Consumption or Operating Cost. In *Power Electronics and Applications European Conference* Lappeenranta: IEEE, 2014,
- [75]. KRAVTZOFF, I. DESSANTE, P. VANNIER, J.C. MANFE, P. and MOUNI, E. Optimal Control Strategy to Design a Hybrid Electrical System. In: *Power Electronics Machines and Drives International Conference* Manchester: IET2014, pp. 1- 6.ISBN: 978-1-84919-815-
- [76]. ROSADO, S. MA, X. FRANCIS, G. WANG F. and BOROEYEVICH, D. Model-Based Digital Generator Control Unit for a Variable Frequency Synchronous Generator with Brushless Exciter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.2008, vol. 23, iss. 1, pp. 42-52.ISSN: 0885
- [77]. MAALOUF, A. NAOUAR, M.W. MONMASSON, E. NAASSANI, A.A. LEBALLOIS, S. and MIDY,J. Digital Control of Brushless Excitation Synchronous Starter/Generator in the Generation Mode. In: *34th Annual Conference on Industrial Electronics Society (IECON)*.Orlando: IEEE,2008, pp. 1155-1160.ISBN: 978-1-4244-1767
- [78]. SHABIB, G. MOSLEM, A.G. and RASHWAN, A.M. Optimal Tuning of PID Controller for AVR System Using Modified Particle Swarm Optimization. In: *International Conference on Fuzzy Systems*. Barcelona: IEEE, 2005, pp. 104-110.ISBN: 978-960-474-195-3
- [79]. GAING ZWE-LEE. A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.2004, vol. 19, iss.2, pp.384-391.ISSN: 0885-8969. DOI: 10.1109/TEC.2003.821821.
- [80]. AMER, M. L. HASSAN, H.H. and YOUSSEF, H.M. Modified Evolutionary Particle Swarm Optimization for AVR-PID Tuning. In: *Communications and Information Technology, Systems and Signals*, Attica: IEEE,2008,pp.164-173.ISBN: 978-960-6766-69-5.
- [81]. LI, W. ZHANG X. and LI, H.A Novel Digital Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generator. In: *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*.Zhejiang:
- [82]. MUKHERJEE, V. and GHOSHAL, S. P. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System *Electric Power Systems Research*.2007, vol.

- 77, iss.12, pp.1689–1698.ISSN: 0378-7796. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.12.004.
- [83]. KENNEDY, J. and EBERHART, R. C. Particle Swarm Optimization. In: *International Conference on Neural Networks*. Perth: IEEE, 1995, pp. 1942-1948.ISBN: 0-7803-2768-
- [84]. RAJENDRA, R. and PRATIHAR, D.K. Particle Swarm Optimization Algorithm vs Genetic Algorithm to Develop Integrated Scheme for Obtaining Optimal Mechanical Structure and Adaptive Controller of a Robot *Intelligent Control and Automation*, 2011, vol. 2, iss.4, pp. 430-449. ISSN: 2153-0653.DOI: 10.4236/ica.2011.24050.
- [85]. EL-ABD, M. *Cooperative Models of Particle Swarm Optimizers*. Waterloo, 2008, PhD. Theses University of Waterloo, Canada Supervisor: Mohamed Kamel.
- [86]. ROBINSON, J. and RAHMAT-SAMII, Y. Particle Swarm Optimization in Electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52,
- [87]. NABAVI-KERIZI, SH. ABADI, M. and KABIR, E. A., PSO-based Weighting Method for Linear Combination of Neural Networks *Computers and Electrical Engineering*, 2010, vol. 94, iss. 5, pp. 36-886. ISSN: 0045-7906. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2008.04.006

ANNEXES

Annexes A

Paramètres des machines

1. Paramètres de l'alternateur principal

La 1^{ère} machine synchrone à excitation est une génératrice synchrone sans amortisseurs, les paramètres ont été identifiés dans le Laboratoire d'Electrotechnique de l'Université de BATNA 2.

a- Tension d'excitation :

$$U_f = 220V$$

b- Résistances :

$$\text{Résistance de phase : } R_s = 9.91.4\Omega$$

$$\text{Résistance de l'inducteur : } R_f = 6.28 \Omega$$

$$\text{Résistance de charge : } R_{ch} = 0.628 \Omega$$

c- Inductances et mutuelle :

$$\text{Inductance cyclique sur l'axe directe: } L_d = 0.74H$$

$$\text{Inductance cyclique sur l'axe transversal: } L_q = 0.1818H$$

$$\text{Inductance de l'inducteur: } L_f = 0.29H$$

$$\text{Inductance de la charge: } L_{ch} = 0.159H$$

$$\text{Inductance cyclique mutuelle stator-rotor: } M = 4.003H$$

2. Paramètres de l'excitatrice

a- Tension d'excitation :

$$U_f = 10V.$$

b- Résistances :

$$\text{Résistance de phase : } R_s = 0.2498\Omega$$

$$\text{Résistance de l'inducteur : } R_f = 0.32165\Omega$$

$$\text{Résistance de charge : } R_{ch} = 8 \Omega.$$

c- Inductances et mutuelle :

$$\text{Inductance cyclique sur l'axe directe: } L_d = 0.029852H$$

Inductance cyclique sur l'axe transverse: $L_q=0.01487H$

Inductance de la charge $L_{ch}=0.2388H$

Inductance d'excitation $L_f=0.030888H$.

Inductance cyclique mutuelle stator-rotor $M=0.028895H$.

3. Paramètres de la machine synchrone à aimant permanent

a- Tension

$U = 220V$.

b- Résistances :

Résistance de phase : $R_s=1.4\Omega$

Résistance de charge : $R_{ch}=8 \Omega$.

c-Inductances et mutuelle :

Inductance cyclique sur l'axe directe: $L_d=0.0066H$

Inductance cyclique sur l'axe transverse: $L_q=0.0058H$

Inductance de la charge: $L_{ch}=0.0159H$

Flux aimant permanent: $\phi_f=0.1546Wb$

Annexe B

Structure du programme principal MS3E

Le programme principal nommé **MS3E**, a été réalisé sous MATLAB, il peut appeler des schémas bloc réalisés sous simulink, en utilisant la commande **sim** et call pour appeler les programmes réalisés sous MATLAB tel que PSO.

Grace à la commande **sim** on peut exciter un schéma bloc réalisé sous simulink à partir d'un programme MATLAB, cette commande permet aussi de contrôler tous les paramètres de simulation depuis un seul endroit, et lancer les programmes de simulink en tant qu'on veut, c'est très intéressant pour la méthode itérative tel que PSO, l'organigramme de traitement est présenté dans la figure suivante :

