

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème**

Régulation de la Vitesse d'un alternateur Synchrone

Devant le jury composé de :

LARGET Soulef      Président

BEGGAT Fateh      Examineur

GUERFI Youcef      Encadreur

Présenté par :

- ABDULAZIZ Imad Gamil

- MAKAOUI Taher

- MAHMOUDI Hocine

2018-2019

## *Remerciements*

*Nous remercions avant tous ALLAH pour son aide, qui nous a guidé sur la bonne voie ses innombrables dons, ALLAH qui nous donne la santé, la volonté, la patience, le courage et la force pour accomplir nos études.*

*Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Mr. Guerfi Youcef, notre encadreur qui a assuré la direction de ce travail. Nous avons profité d'un encadrement scientifique de qualité.*

*Nous le remercions pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour nous d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail et pour ses conseils.*

*Nos remerciements vont au président du jury et aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du génie mécanique qui ont contribué à notre formation.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes chères parents qui étaient à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout ce que j'ai fait de moi par leurs sacrifices, qui m'ont donné tout le courage, la tendresse et la patience, Comme je souhaitais qu'ils soient présents pour se réjouir avec moi.*

*A mes chers frères*

*A mes chères sœurs*

*A Toute mon chère famille.*

*A Tous mes amis qui sont de près ou de loin.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du*

*Primaire, du moyen, du secondaire ou de*

*l'enseignement supérieur.*

*Imad*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents qui m'ont fait l'origine de ce succès*

*A mes chers frères*

*A mes chères sœurs,*

*A tous mes amis*

*A toute ma famille*

*A tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin*

*Taher*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à ma chère mère et A l'âme de mon défunt père, que je prie Dieu, le tout Puissant de l'accueillir dans son vaste paradis.*

*A mes chers frères*

*A mes chères sœurs*

*A Toute mon chère famille.*

*A tout mes amis et à toutes les personnes qui ont  
Contribué de près au de loin à la l'aboutissement et à  
la réussite de ce travail.*

*Hocine*

# Sommaire

<b>Liste Des Figures</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste Des Symboles</b> .....	<b>ii</b>
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : L'état de L'art de Système</b>	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Symboles.....	3
I.3. Types des machines synchrones .....	3
I.3.1. Moteur synchrone .....	3
I.3.2. Générateur synchrone .....	4
I.4. Classification des machines synchrones .....	4
I.4.1. Machine synchrone à réluctance variable .....	4
I.4.2. La Machine synchrone à Rotor bobiné .....	5
I.4.2.1. Machine Synchrone à Rotor à pôles saillants.....	5
I.4.2.2. Machine Synchrone à Rotor à pole lisse .....	6
I.4.3. Les rotors de la Machine Synchrone à aimant permanent .....	7
I.4.3.1. Machine Synchrone à aimant permanent en surface .....	7
I.4.3.2. Machine Synchrone à aimants permanents insérés .....	7
I.4.3.3. Machine Synchrone à aimants permanents enterrés.....	8
I.4.3.4. Machine Synchrone à aimants permanents à concentration de flux.....	8
I.4.4. Machine synchrone à double excitation (MSDE).....	9
I.5. Description de la machine synchrone .....	9
I.6. Construction d'un générateur synchrone .....	9
I.7. Les Systèmes D'excitation .....	10
I.7.1. Exigences d'un système d'excitation .....	10
I.7.2. Éléments d'un système d'excitation.....	11
I.7.3. Différents types de système d'excitation.....	12
I.7.3.1. Système d'excitation à courant continu (DC) .....	12

I.7.3.2. Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC) .....	13
I.7.3.3. Systèmes d'excitation statique .....	15
I.8. Couplage des alternateurs sur le réseau .....	16
I.9. Le correcteur .....	17
I.10. But de la correction .....	17
I.11. Différents types des correcteurs .....	17
I.11.1. Régulateur à action proportionnelle (P) .....	18
I.11.2. Régulateur à action intégrale (I) .....	19
I.11.3. Régulateur dérivateur pur (D) et régulateur dérivateur filtré.....	20
I.12. Le régulateur PID.....	21
I.12.1. Définition. ....	21
I.12.2. Domaine d'application et limites du régulateur PID .....	22
I.12.3. Les avantages et les inconvénients du régulateur PID.....	22
I.13. Régulateur automatique de tension .....	23
I.13.1. Régulation et stabilisation de la tension d'excitation .....	23
I.13.2. Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone : .....	24
I.14. Régulation de la vitesse de rotation .....	29
I.15. Conclusion .....	31
<b>Chapitre II: Modélisation de Système</b>	
II.1. Introduction .....	32
II.2. Modélisation de la génératrice synchrone .....	32
II.2.1. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc .....	32
II.2.2. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dqO) : .....	34
II.3. Moteurs à combustion interne .....	37
II.3.1. Le moteur diesel .....	38
II.3.2. Cycle du moteur.....	39
II.3.3. Modélisation du moteur diesel .....	41
II.3.4. Production du couple mécanique.....	42

II.4. Conclusion : .....	43
--------------------------	----

### **Chapitre III: Simulation de Système**

III.1. Introduction .....	44
---------------------------	----

III.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™ .....	44
---	----

III.2.1. Matlab.....	44
----------------------	----

III.2.2. Simulink .....	45
-------------------------	----

III.3. Avantage de la simulation numérique .....	46
--	----

III.4. Description .....	46
--------------------------	----

III.5. Les résultats de simulation .....	53
--	----

III.6. Discussion .....	57
-------------------------	----

III.7. Conclusion.....	58
------------------------	----

Conclusion générale .....	44
---------------------------	----

### **Bibliographie**

### **Résumé**

## Liste Des Figures

Figure I.1: Symboles de la machine synchrone.....	3
Figure I.2: Moteur synchrone.....	3
Figure I.3: Rotor d'une machine synchrone à réluctance variable.....	4
Figure I.4: Rotor à pole saillant.....	5
Figure I.5: Rotor à pole lisse .....	6
Figure I.6: Différents structures des rotors des MSAP .....	8
Figure I.7: Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone .....	11
Figure I.8: Système d'excitation de type DC.....	13
Figure I.9: Excitation de type AC avec redresseur non commandé .....	13
Figure I.10: Excitation type AC avec redresseur commandé.....	14
Figure I.11: Système d'excitation de type Brushless.....	14
Figure I.12: Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.....	15
Figure I.13: Couplage d'une machine synchrone sur un réseau .....	16
Figure I.14: Asservissement par un régulateur PID .....	21
Figure I.15: Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine alternateur.....	23
Figure I.16: Système d' excitation type STI de IEEE.....	24
Figure I.17: Régulation et stabilisation de la tension d'excitation.....	24
Figure I.18: Régulation de la tension de sortie de la génératrice .....	25
Figure I.19: Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique .....	25
Figure I.20: Schéma de régulation de tension simplifié.....	26
Figure I.21: Principe de la régulation de la vitesse .....	29
Figure I.22: Régulateur de vitesse type PID.....	30
Figure I.23: Schéma bloc du Servomoteur.....	30
Figure II.1: Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc). .....	33
Figure II.2: Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel dqO) .....	34

Figure II.3: Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu) .....	36
Figure II.4: Les éléments du moteur diesel .....	38
Figure II.5: Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons.....	39
Figure II.6: Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps. ....	40
Figure III.1: Schéma bloc global du système.....	48
Figure III.2: Modèle électrique de la machine synchrone.....	49
Figure III.3: Modèle mécanique de la machine synchrone .....	50
Figure III.4: Bloc de la Charge électrique.....	51
Figure III.5: Bloc du système d'excitation.....	51
Figure III.6: Bloc du régulateur de tension .....	52
Figure III.7: Bloc de la régulation de vitesse et le moteur diesel.....	52
Figure III.8: le courant d'excitation .....	53
Figure III.9: La tension de champ. ....	53
Figure III.10: tension aux bornes de la machine synchrone.....	54
Figure III.11: la puissance de sortie mécanique du moteur diesel. ....	54
Figure III.12: La vitesse du groupe électrogène.....	55
Figure III.13: tension abc de la machine synchrone.....	55
Figure III.14: courant abc de la machine synchrone .....	56
Figure III.15: tension abc d'excitation .....	56
Figure III.16: courant abc d'excitation.....	56

## Liste des Symboles

Symboles	Noms
MS	Machines synchrones
CC	Courant continu A
AC	Courant alternatif A
MSRV	Machine synchrone à réluctance variable
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MSDE	Machine synchrone à double excitation
MSRB	Machine synchrone à Rotor bobiné
$L_d$	L'inductance dans l'axe direct H/pu
$L_q$	L'inductance dans l'axe quadrature H/pu
F.e.m	Force électromotrice
HT	Haute tension v
PSS	Stabilisateur de puissance
PI	Proportionnel, intégral
PID	Régulateur classique
$K_p$	Gain proportionnel du PID
$K_i$	Gain intégral du PID
$K_d$	Gain dérivée du PID
AVR	Régulateur Automatique de tension
ST	Statique
$V_s$	Vecteur tension au stator v
$T_I$	Constante intégrale du temps
$T_D$	Constante dérivée du temps
$K_f$	Gain de compensation de l'excitatrice S T
$\varepsilon$	Coefficient d'amortissement
$\omega_n$	Pulsation propre du système pu
$V_f$	Tension d'excitation v/pu
$V_c$	Tension corrigée à la sortie du régulateur PID v/pu
$T_f$	Constante de temps du compensateur
$\alpha$	Angle d'amorçage des thyristors rad

$\Phi$	Vecteur du flux Wb/pu
$\Phi_s \Phi_r$	Vecteur flux au stator et rotor pu
$\Phi_a \Phi_b \Phi_c$	Flux au stator repère abc Wb/pu
$\Phi_d \Phi_Q$	Flux axe d et q Wb/pu
$\Phi_f$	Flux de champ Wb/pu
$I_s I_r$	Vecteur courant au stator et rotor pu
$i_f$	Courant de champ A/pu
$i_d i_Q$	Courants axe d et q A/pu
$i_a i_b i_c$	Courants au stator repère abc A/pu
$L_{rr} L_{ss} L_{sr}$	Matrices des inductances mutuelles H
$\Phi_s^{abc} \Phi_s^{dq0}$	Vecteurs flux au stator wb
$\Phi_r^{abc} \Phi_r^{dq0}$	Vecteurs flux au rotor wb
$i_s^{abc} i_s^{dq0}$	Vecteurs courant au stator A
$i_r^{abc} i_r^{dq0}$	Vecteurs courant au rotor A
$V_s^{abc} V_s^{dq0}$	Vecteurs tension au stator v
$V_r^{abc} V_r^{dq0}$	Vecteurs de tension au rotor v
$v_f$	Tension aux bornes de la charge v
$v_a v_b v_c$	Tensions au stator repère abc v/pu
$V_s V_r$	Vecteur tension au stator et rotor pu
$R_r$	Matrice résistance au rotor $\Omega$ /pu
$R_s$	Matrice résistance au stator $\Omega$ /pu
$r_f r_D r_Q$	Résistances de champ, d'amortisseurs D et Q $\Omega$ /pu
$\omega_m$	Vitesse de synchronisme rad/s
$X_{ss} X_{rr} X_{sr}$	Matrices des réactances mutuelles pu
$x_d x_q$	Réactances propres d'axe d et q pu
$X_{md} X_{mq}$	Réactances de magnétisation d'axe d et q pu
$X_{kf_1}$	Réactance de Kanye pu
$\omega_n$	Pulsation propre pu
$\omega_{réf}$	Vitesse de référence rad/s

$T_m$	Couple mécanique N.m
$C_r$	Couple résistant dû à la charge appliquée N.m
$T_e$	Couple électromagnétique N.m
$P_i$	Puissance fournie w
$P_{diss}$	Puissances résistantes w
$p_{ci}$	Pouvoir calorifique inférieur du carburant
$n_i$	Le rendement indiqué du moteur
$m_f$	Débit de carburant injecté dans la chambre de combustion
$P$	Pression moyenne des pertes par frottement
$C_y$	Cylindrée totale du moteur N.m
$T_{Dm}$	Couple mécanique N.m

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Jusqu'à un passé récent, les machines à courant continu ont été majoritairement utilisées dans les entraînements à vitesse variables, en revanche l'apparition des machines synchrones à courant alternatif dans le monde des actionneurs électriques a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques en leur ouvrant de nouvelles opportunités grâce à leur caractéristiques de fonctionnement.

Les machines triphasées à courant alternatif permettent la transformation *électrique-mécanique* et *vis-versa*. Elles sont les plus largement utilisées dans les applications industrielles et domestiques depuis longtemps après une version des machines biphasées qui n'a pas prospéré. Néanmoins, la machine synchrone est la plus populaire, cela est dû à sa simplicité de construction et de maintenance, sa fiabilité, sa robustesse et sa puissance massique élevée.

Le but de ce mémoire est d'apporter une modélisation et simulation d'un système en boucle fermé pour la régulation de la vitesse d'un alternateur, donc l'objectif de notre travail est d'étudier le système (alternateur-moteur diesel) avec une charge électrique variable, et réaliser une régulation adaptative à cette variation.

Pour atteindre les objectifs fixés nous avons réalisé ce travail structuré comme suit :

Ce mémoire est réparti en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de notre système, en commence par une générale sur les machines synchrones triphasés (constitution, Principe de fonctionnement, caractéristique...), puis nous avons présentés les différents systèmes d'excitations, et finalement, une étude profonde sur différents types des correcteurs.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de notre système (chaque modèle indépendamment). Premièrement, le modèle mathématique de la génératrice synchrone, puis nous avons exposé la modélisation pour le moteur diesel mais après une bref notion sur ce dernies.

Dans le dernier chapitre nous allons valider la simulation numérique de système dans l'environnement MATLAB /SIMULINK, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenues.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent travail.

# **Chapitre I : L'état de L'art de Système**

## I.1. Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants permanents soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [1].

Les machines synchrones jouent un rôle important dans l'industrie. Leur domaines d'emploi consistent à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ou vice-versa. C'est une machine caractérisée par sa vitesse de rotation synchronisée avec la fréquence du réseau.

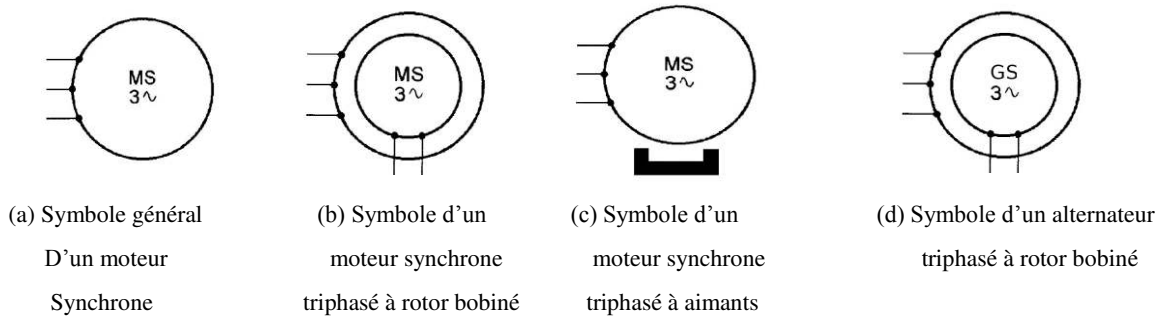
Elle peut fonctionner en moteur, compensateur ou génératrice (alternateur).

Les machines synchrones (MS) de faible puissance ( $\leq 5$  kW) sont par fois réalisées comme les machines à CC, c'est-à-dire l'inducteur au stator (fixe) et l'induit au rotor (tournant), par contre pour les MS de grande puissance en exécution inverse parce que:

- ❖ La puissance d'excitation constitue 0,3 à 2 % de la puissance à transformer.
- ❖ La tension d'excitation (12 à 400 V) est inférieure à la tension d'induit ( $\leq 25$  kV)[2].

## I.2. Symboles

Voici les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) [3].



**Figure I.1 :** Symboles de la machine synchrone

## I.3. Types des machines synchrones

### I.3.1. Moteur synchrone

Les machines synchrones peuvent fonctionner comme générateur ou comme moteur. Lorsqu'on l'utilise comme moteur, on alimente le stator sous une tension alternative pour créer un champ statorique tournant, entraînant le rotor à tourner en synchronisme avec le champ tournant du stator d'où vient le nom moteur synchrone. Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la tension d'alimentation du stator en dépit de la charge mécanique entraînée.

La plupart des moteurs synchrones ont une puissance comprise entre 150 kW (200 HP) et 15 MW (20 000 HP) et leur vitesse synchrone est habituellement comprise entre 180 et 450 tr/min. Ils sont donc surtout utilisés dans l'industrie lourde [4] [5].



**Figure I.2 :** Moteur synchrone [5]

### I.3.2. Générateur synchrone

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie en passant par l'énergie mécanique [1].

Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW[4] . Elles sont utilisées dans différentes centrales de production d'énergie électrique (hydraulique, thermique, nucléaire .....), groupes électrogènes automobile, la marine,...etc [6].

## I.4. Classification des machines synchrones

### I.4.1. Machine synchrone à réluctance variable

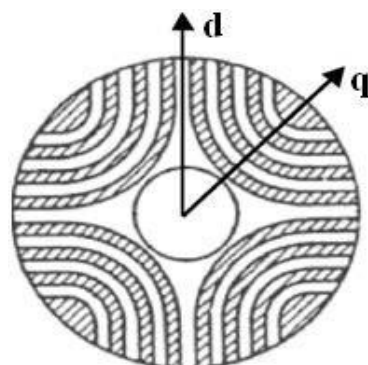
Le stator d'une machine synchrone à réluctance variable est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif.

Sur la figure I(3), on voit le rotor qui ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation, le couple est créé grâce à l'effet de réluctance.

Il est construit avec un rapport  $L_d/L_q$  élevé entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature.

La plage de fonctionnement à puissance constante est directement liée à ce rapport. Plus ce rapport est élevé, plus le facteur de puissance est élevé aussi [7].

Mais ce rapport  $L_d/L_q$  élevé est obtenu au détriment de certaines contraintes de fabrication, qui se répercutent sur le coût.



**Figure I.3 :** Rotor d'une machine synchrone à réluctance variable

## I.4.2. La Machine synchrone à Rotor bobiné

Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à grande vitesse par des turbines à vapeur ou bien des turbines à gaz. Le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu [8]

### I.4.2.1. Machine Synchrone à Rotor à pôles saillants

Pour les machines à rotors à pôles saillants les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés. Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine [9].

Cette technologie de construction du rotor est utilisée avec les alternateurs synchrones à faible vitesse périphérique de l'arbre mécanique (alternateurs hydroélectriques).

Une vitesse d'entraînement faible donc un nombre de paires de pôles élevé est nécessaire pour la création d'un système de courant triphasé à 50 Hz en régime permanent.

Le diamètre du rotor, proportionnelle à  $2p$ , augmente alors avec le nombre de paires de pôles pour atteindre 7 à 8 mètres lorsque ce dernier est de l'ordre de 40 à 60 pôles.

L'axe est relativement de petite longueur et le plus souvent vertical. Pour obtenir des puissances électriques assez élevées à basse vitesse on doit augmenter le couple électromagnétique donc l'induction magnétique créée dans l'entrefer par les enroulements inducteurs [10].



**Figure I .4 :** Rotor à pole saillant [10]

La Figure I(4) c'est un rotor à pole saillant pour un alternateur d'un groupe électrogène de 1500tr/min.

Si la technologie de construction du rotor est celle à pôles saillants à entrefer variable, des inconvénients se présentent :

- Les pôles sont relativement éloignés donc un volume d'air notable inter polaire augmente, la résistivité de l'air et alors les pertes mécaniques.
- A vitesse très élevée, la vibration des particules d'air inter polaires est importante ce qui augmente le bruit acoustique [10].

#### **I.4.2.2. Machine Synchrone à Rotor à pole lisse**

Dans la machine synchrone à rotor à pole lisse le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor est fermées par des clavettes en acier amagnétique. Les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique [9].

Les alternateurs synchrones à pôles lisses, entraînés par des turbines à gaz ou à vapeur, sont appelés "turboalternateurs", il s'agit d'une machine synchrone, de très grandes puissance, dont le rotor tourne avec une vitesse élevée qui peut dépasser 1000 tr/min. Une fréquence de rotation mécanique élevée ( $N$  : tr/min) implique un faible nombre de pair de pôles.

Une disposition appropriée permet d'obtenir des *f.e.m* sinusoïdales à très faible taux d'harmoniques [10].

La figure I(5) contient un rotor à pole lisse pour un turbo-alternateur.



**Figure I.5 :Rotor à pole lisse[6]**

### **I.4.3. Les rotors de la Machine Synchrone à aimant permanent**

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs de configurations rotoriques. Leur classification globale en terme du placement des aimants est le suivant :

- Aimants en surface (Surface magnet type)
- Aimants insérés (Inset magnet type)
- Aimants enterrés (Interior magnet type)
- Aimants à concentration de flux (Burried magnet type)

#### **I.4.3.1. Machine Synchrone à aimant permanent en surface**

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur le rotor, ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure I(6.a). Cette configuration du rotor est la plus utilisée.

Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est sa simplicité donc son faible cout de fabrication par rapport a d'autre machines a aimant. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur.

Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe  $d$  et l'axe  $q$  sont, pratiquement les mêmes [1][11].

#### **I.4.3.2. Machine Synchrone à aimants permanents insérés**

Comme les machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure I(6.b). Le fer entre les aimants permanents crée une

saillance et donne un couple reluctant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe  $q$  est légèrement supérieure à celle dans l'axe  $d$  [1][11].

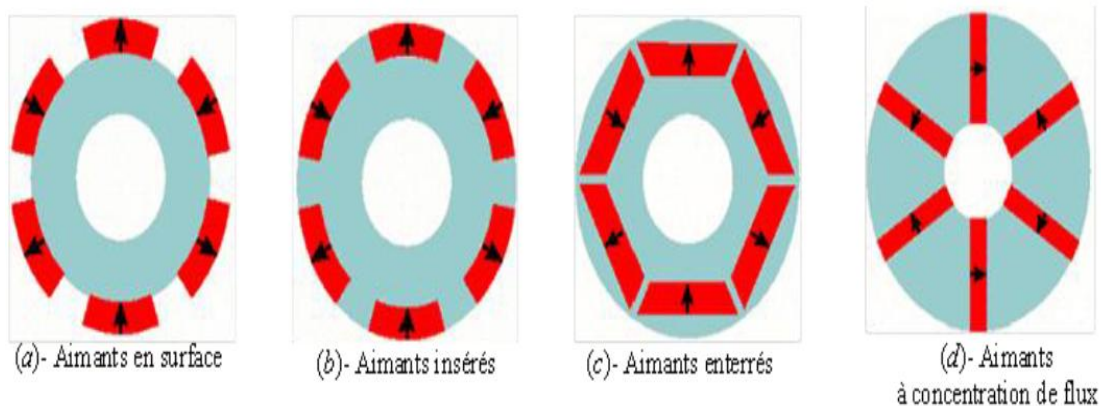
#### I.4.3.3. Machine Synchrone à aimants permanents enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure I(6.c). et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe  $d$  est plus petite que celle de l'axe  $q$ . Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [1][11].

#### I.4.3.4. Machine Synchrone à aimants permanents à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure I(6.d). Les pôles magnétiques se forment alors à niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents.

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants permanents intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe-  $q$  est plus grande que celle de l'axe- $d$  [1] [11].



**Figure I.6 :** Différents structures des rotors des MSAP

#### **I.4.4. Machine synchrone à double excitation (MSDE)**

Les MSDE tentent d'allier les avantages des MSAP (très bon rendement énergétique) à ceux des MSRB (facilité de fonctionnement à vitesse variable), le flux d'excitation dans ces machines est la somme d'un flux créé par des aimants permanents et d'un flux d'excitation créé par des bobines[12].

#### **I.5. Description de la machine synchrone**

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant)

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ».

Il n'est pas possible de faire démarrer correctement, sans aide extérieure, une machine synchrone en connectant ses enroulements statorique directement sur un réseau alternatif.

Si l'on n'entraîne pas le rotor par une force extérieure, il est possible de la faire tourner en alimentant ses enroulements statorique par un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro à la fréquence de synchronisme et en faisant en sorte que la tension aux bornes des enroulements soit proportionnelle à la fréquence. Sa vitesse de synchronisme sera directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique.

Un autre moyen de réaliser l'autopilotage de la machine, c'est-à-dire de maintenir l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, par exemple, en disposant sur son axe un capteur qui délivre une information de la position du rotor. Cette information est traitée par un convertisseur électronique qui fournit le courant statorique à la machine, en phase avec sa force contre-électromotrice[13].

#### **I.6. Construction d'un générateur synchrone**

La composition de l'alternateur est par une partie fixe qui s'appelle stator et une partie tournante s'appelle rotor.

- ❖ Stator (est appelé aussi induit) : il est constitué par des enroulements qui constituent le siège du courant électrique alternatif induit par le changement du flux de champs magnétique due au mouvement relatif l'inducteur par rapport à l'induit [1].
- ❖ Rotor (nommé aussi inducteur) : Il est généralement de deux types.

1-Rotor à aimant permanent ou le champ est constant dans ce cas la tension alternative fournie par la machine ne pas réglable.

2-Rotor bobiné ou bien électroaimant, où le bobinage rotorique est alimenté en courant continu par un collecteur à bague rotatif ou bien avec un système excitation à travers une excitatrice à diodes tournantes [1].

## **I.7. Les Systèmes D'excitation**

### **I.7.1. Exigences d'un système d'excitation**

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont principalement déterminées par la génératrice synchrone et aussi le circuit d'alimentation.

La condition de base est que le système d'excitation doit ajuster le courant de champ afin d'exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie selon la consigne.

La fonction de base de l'excitation est alors de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone; de plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive [14] [15] [16], ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines), le tout par le biais 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 [14] [17]. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux.

Historiquement, le rôle du système d'excitation dans l'amélioration des performances du système de production 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 génératrices. Quant le contrôle de la tension génératrice a été automatisé la première fois, il était lent. Au début des années 1920, l'intégration des régulateurs continus dans les systèmes d'excitations a contribué dans le développement de

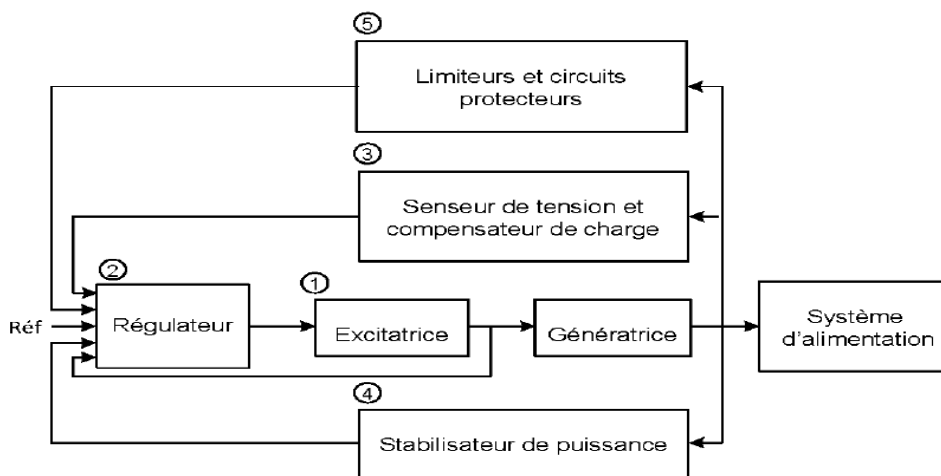
ceux-ci, permis d'obtenir de meilleurs résultats, et suscité l'intérêt d'un grand nombre d'industriels. Depuis ce moment, le système d'excitation a connu une évolution continue. À partir des années 1960, l'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargis en utilisant des signaux de stabilisation auxiliaires. En plus de la régulation de tension de sortie, l'excitation permettait d'amortir les oscillations de puissance du système à l'aide de stabilisateur de puissance (*power system stabilizer*) [18] [19]. Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT) [14] [20].

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes [14] [21] :

- Respecter les critères souhaités du cahier de charge.
- Fournir les limitations nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice elle-même, de la Génératrice, et des autres équipements (turbine, réseau, ... etc.).
- Respecter les exigences tout en assurant une flexibilité d'opération (régulation stabilisation, ....etc.)
- Assurer la fiabilité et la validité des équipements.

### I.7.2. Éléments d'un système d'excitation

Le schéma ci-dessous Figure I(7) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones.



**Figure I.7 :** Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone [ 14]

(1) L'excitatrice: fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor. Typiquement, un générateur d'une puissance de 600MW nécessite une excitatrice d'environ 1MW.

(2) Le régulateur : permet de contrôler et stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice.

(3) Le senseur de tension : mesure la tension aux bornes de la machine, la filtre et la redresse en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence (tension voulue aux bornes de la machine).

Le compensateur de charge : est un élément additionnel et facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine.

(4) Le stabilisateur de puissance (PSS) : il fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur du système d'excitation afin d'amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.

(5) Les limiteurs et les circuits protecteurs : sont toute une gamme de moyens qui s'assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas outrepassées. Par exemple, limitation du courant d'excitation, limiteur de surexcitation, limiteur de tension et limiteur de sous-excitation.

### **I.7.3. Différents types de système d'excitation**

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitations pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels [14] [22]:

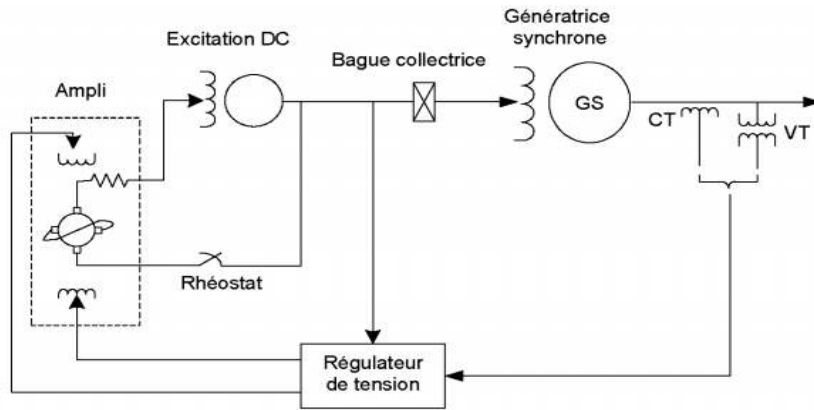
- ✓ Systèmes d'excitation à courant continu (DC)
- ✓ Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)
- ✓ Systèmes d'excitation statiques

Dans cette section, ces différents types d'excitation seront décrits, suivant la forme et la structure générale de chaque.

#### **I.7.3.1. Système d'excitation à courant continu (DC)**

Cette catégorie d'excitation utilise une machine à courant continu comme source d'excitation, fournissant le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice, et peut être soit auto-excitée, soit excitée séparément.

L'excitation à courant continu est la première utilisée de l'année 1920 jusqu'en 1960 où elle a été remplacé par l'excitation de type AC . Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisé pour fin d'étude de la stabilité car il exige une modélisation complexe. Il est souvent remplacé par l'excitatrice de type AC ou l'excitatrice statique ST [14].

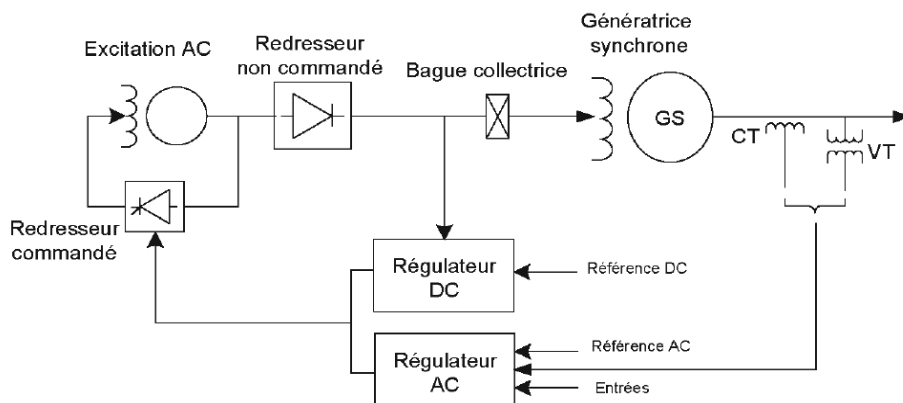


**Figure I.8 :** *Système d'excitation de type DC*

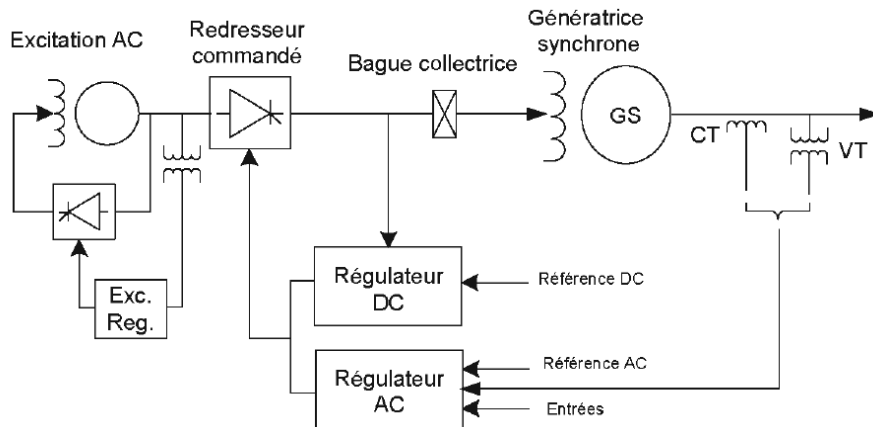
**I.7.3.2. Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)**

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé a 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.

Les Figure I(9) et I (10) montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

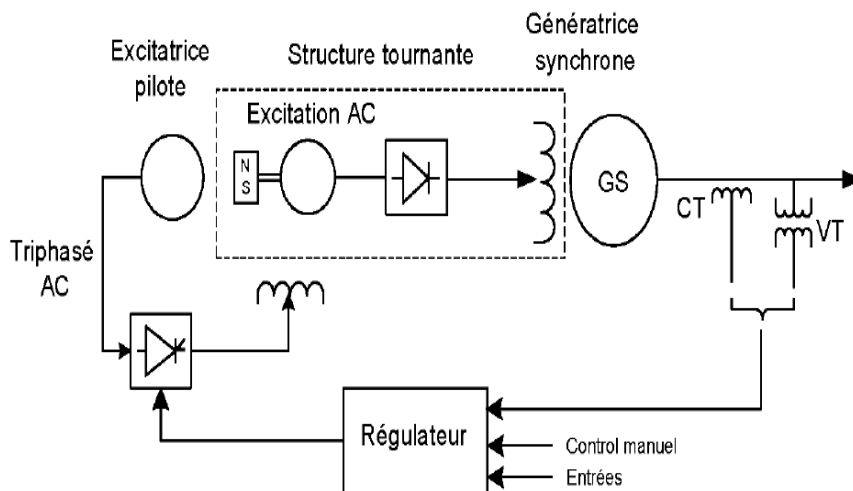


**Figure I.9 :** *Excitation de type AC avec redresseur non commandé*



**Figure I.10 :**Excitation type AC avec redresseur commandé

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(11) illustre l'excitation AC de type *Brushless* où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante [14] [22].

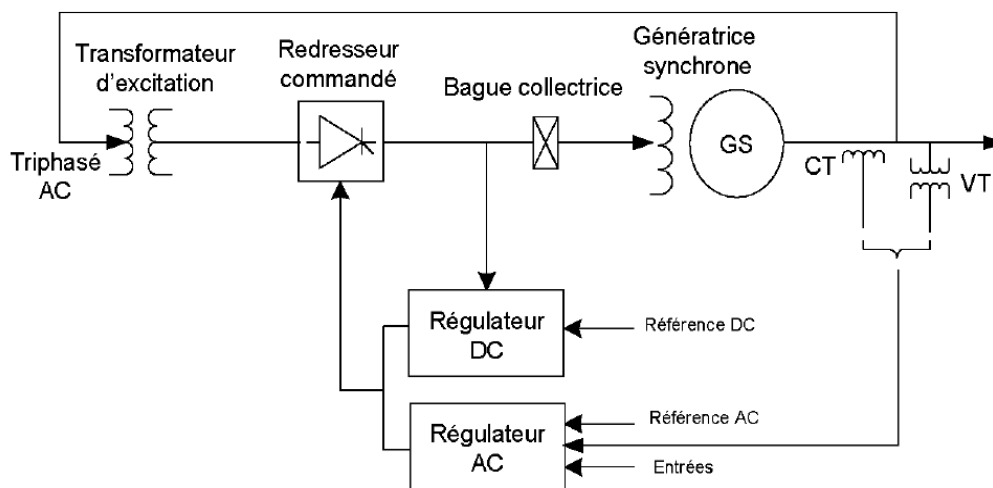


**Figure I.11 :**Système d'excitation de type *Brushless*

### I.7.3.3. Systèmes d'excitation statique

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. Le redresseur statique fournit le courant d'excitation de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices, et celui-ci est alimenté par la génératrice synchrone à travers un transformateur d'excitation. Cependant il existe trois types d'excitation statique :

- (a) avec redresseur commandé à source de tension
- (b) avec redresseur non commandé à source combinée
- (c) avec redresseur commandé à source combinée



**Figure I.12 :** Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [14]

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension Figure I(12) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques unes de ses caractéristiques :

- Pas de partie tournante à part la machine.
- Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ... etc.) [23].
- Moins coûteuse et facile à entretenir
- Plus adaptée pour les petites centrales hydroélectriques

## I.8. Couplage des alternateurs sur le réseau

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes [4] :

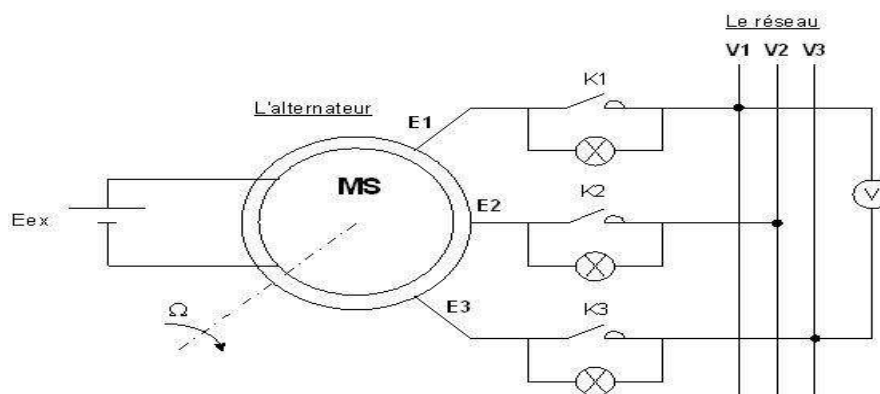
- 1-la tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau.
- 2-la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- 3- la tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau.

La procédure de synchronisation en agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau. On observe que les tensions ont même fréquence et même phase au moyen d'un synchronoscope [4].

Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier. La tension et la fréquence appliquées aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres [24] :

- 1- le courant d'excitation.
- 2- le couple mécanique exercé par le système d'entraînement mécanique du rotor.

La Figure I(13) représente le couplage d'un alternateur sur le réseau électrique en utilisant la technique de synchronisation avec des lampes.



**Figure I.13 :** Couplage d'une machine synchrone sur un réseau [9]

## I.9. Le correcteur

Sans mettre en jeu de l'énergie appréciable, le correcteur constitue la partie « intelligente » de l'asservissement et sa détermination judicieuse confère à l'asservissement ses qualités. Aisé à modifier, le correcteur peut être muni d'une variation automatique de ses paramètres suivant la plage de fonctionnement du procédé, dans le cas où celle-ci évolue lentement [25], [26].

## I.10. But de la correction

Le concepteur de l'asservissement rencontre deux types de situations auxquelles, il doit faire face :

- Assurer une réponse acceptable pour des signaux de consigne définis en fonction du temps (par exemple : cycle de température pour un traitement thermique) ;
- Fournir des caractéristiques fréquentielles (gain, déphasage) demandées dans une bande de fréquences (par exemple : asservissement du mouvement d'un haut-parleur dans un système haute fidélité).

On impose les qualités de l'asservissement en termes de **spécifications temporelles** dans le premier cas, en **spécifications fréquentielles** dans le second cas.

Le but de la correction est de doter l'asservissement des qualités attendues, par le calcul et l'implantation du correcteur nécessaire.

Les opérateurs essentiels du correcteur sont réalisables à partir d'amplificateurs à courant continu et d'éléments résistances/capacités.

La réalisation numérique peut se transposer aisément à partir d'un schéma analogique, en conservant la même organisation fonctionnelle et en associant un intégrateur numérique à chaque intégrateur électronique [27].

## I.11. Différents types des correcteurs

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ces trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'une régulation d'un processus modélisé du deuxième ordre [28].

La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "PID".

**P**: Action proportionnelle.

**I** : Action intégrale.

**D**: Action dérivée.

L'adaptation d'un régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme:

- ❖ Paramètre  $K_p$  pour le réglage de l'action proportionnelle.
- ❖ Paramètre  $K_i$  pour le réglage de l'action intégrale.
- ❖ Paramètre  $K_d$  pour le réglage de l'action dérivée.

### I.11.1. Régulateur à action proportionnelle (P)

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple et naturelle, puisqu'il construit une commande  $u(t)$  proportionnelle à l'erreur  $e(t)$ . Cette action s'apparente à un effet ressort (ressort de rappel). Il agit principalement sur le gain du système asservi et permet donc d'améliorer notablement la rapidité, la précision et la stabilité [29].

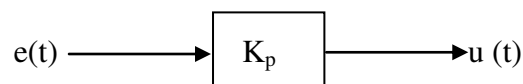
– Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (\text{I.1})$$

– Fonction de transfert du régulateur P :

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{E(s)} = K_p \quad (\text{I.2})$$

Schéma fonctionnel du régulateur P :



#### ❖ Avantages et inconvénients de l'action proportionnelle

On voit que le régulateur P assure une transmission instantanée du signal d'erreur ; dans ce sens, son action est relativement dynamique : sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui se passe à l'instant présent.

Une limitation du régulateur P est son incapacité à annuler notamment l'erreur statique  $E_{lv}$  en régulation de maintien, i.e. celle qui apparaît consécutivement à l'intervention d'une perturbation constante. En effet, si la commande  $u(t)$  appliquée au système doit être non-nulle

afin que celui-ci puisse retrouver ou maintenir son état d'équilibre, il est dans le même temps nécessaire que l'erreur soit non-nulle puisque :

$$u(t) \neq 0 \rightarrow u(t) = K_p \cdot e(t) \neq 0 \iff e(t) \neq 0$$

- Si K (ou  $X_p$ ) augmente :
  - La réponse s'accélère
  - L'erreur statique diminue
  - La stabilité se dégrade : risques d'instabilité
- Variation en % de l'entrée du régulateur qui fait varier la sortie de 100%
- $BP\% = 100/K$ .
- BP de l'ordre de 3 à 400% dans les régulateurs électroniques. Dans les régulateurs industriels, elle est appelée  $X_p$ .

### I.11.2. Régulateur à action intégrale (I)

Le problème de l'erreur statique Les exemples des asservissements de vitesse et de température vus précédemment ont montré qu'un système, même contre-réactionné par un régulateur P, pouvait présenter une erreur permanente en régime permanent constant. Cette erreur intervenant alors que les signaux d'entrée (consigne ou perturbation) sont constants, on la désigne par erreur statique [29].

Pour remédier au problème du statisme la solution consiste à intégrer l'erreur.

La loi de commande pour un intégrateur pur, la loi de commande  $s(t)$  est de la forme:

$$u_i(t) = \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t e(t) \cdot dt \quad (\text{I.3})$$

D'après la transformée de Laplace d'une fonction intégrale, on a

$$S(p) = \frac{1}{T_i} \varepsilon(p) \quad (\text{I.4})$$

La fonction de transfert d'un correcteur intégrateur pur est par conséquent :

$$R(p) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_i p} \quad (\text{I.5})$$

La constante de temps  $T_i$  exprimée souvent en unité de temps est appelée la constante de temps d'intégration.

### ❖ Avantages et inconvénients de l'action Intégrale : I

- permet d'annuler l'erreur statique
- Accélère la réponse
- Plus l'action intégrale est élevée ( $T_i$  petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade.
- Il faut également trouver un bon compromis entre vitesse et stabilité.
- Dans les régulateurs industriels on affiche  $1/T_i$ , alors  $T_i$  est d'autant plus grand que l'action intégrale est faible.
- Pas d'action I :  $T_i$  infini

### I.11.3. Régulateur dérivateur pur (D) et régulateur dérivateur filtré.

La loi de commande est de la forme :

$$s(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{I.6})$$

soit d'après la transformée de Laplace :

$$s(p) = T_d p \varepsilon(p) \quad (\text{I.7})$$

La fonction de transfert du correcteur dérivé est donc :

$$R(p) = \frac{s(p)}{\varepsilon(p)} = T_d p \quad (\text{I.8})$$

La constante de temps  $T_d$  de dimension l'unité de temps est appelée la constante de temps de dérivation. Elle intervient également comme un gain.

La fonction de transfert de ce type de correcteur est purement théorique : un système physique ne peut pas avoir un numérateur de degré supérieur à celui du dénominateur [29].

Le correcteur approchant le mieux l'effet dérivé tout en étant réalisable est un correcteur dérivateur filtré de la forme :

$$R(p) = \frac{T_d p}{1 + \tau p} \quad (\text{I.9})$$

Avec  $\tau = \frac{T_d}{N}$  et  $N$  entier  $> 1$  (5 à 10).

### ❖ Avantages et inconvénients de l'action de l'action D.

On distingue deux effets :

Effet statique : l'action du régulateur D n'intervient que sur la dérivée de l'erreur, c'est-à-dire qu'elle est sensible à la variation de l'erreur et non à l'erreur elle-même. Lorsque celle-ci est constante (régime statique) le dérivateur n'a aucun effet. En d'autres termes, le régulateur D ne peut rien faire face à erreur constante. Bien que d'apparence il s'agit d'une limitation de cette action, ceci n'est pas gênant en soit, car pour annuler ou réduire les erreurs permanentes, c'est surtout l'action I qui est nécessaire.

Effet dynamique: l'intérêt principal de la correction dérivée est sa sensibilité aux variations de l'erreur. Elle s'oppose aux grandes variations de l'erreur (donc à la tendance de la variation de l'erreur). D'où son effet stabilisant. Le fait qu'elle apporte un déphasage positif de  $90^\circ$  confirme cet effet stabilisant puisque les marges de stabilité ont tendance d'augmenter.

Résumé :

- Anticipatrice
- Si l'action dérivée augmente ( $T_d$  grand), la réponse s'accélère.

## I.12. Le régulateur PID

### I.12.1. Définition.

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé ».

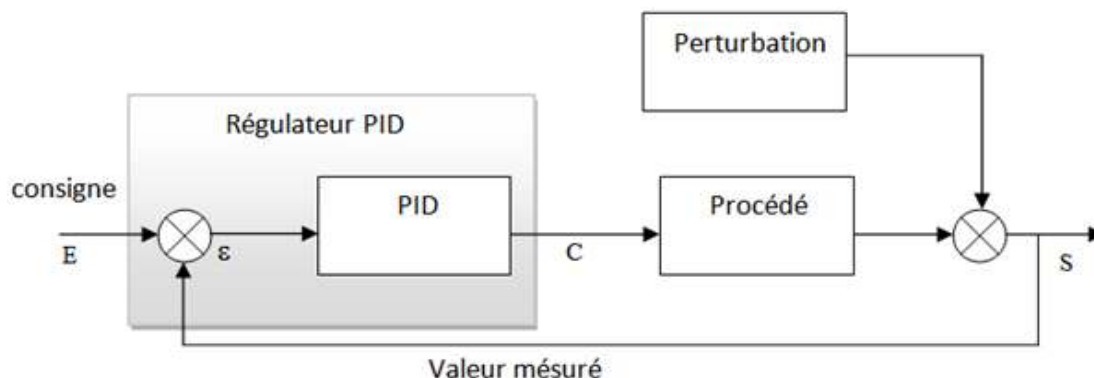


Figure I.14: Asservissement par un régulateur PID

$S$  signal de mesure,  $E$  consigne (valeur entrée ou signal), et  $\varepsilon$  signal d'écart (ou d'erreur  $e(t)$ ) sont exprimés dans la même unité. Le signal  $C$  élaboré par le régulateur est le signal de commande [30].

**Rappelle :** l'erreur statique est la valeur définie entre la consigne d'entrée et la valeur mesurée.

### **I.12.2. Domaine d'application et limites du régulateur PID**

Dans le monde industriel, le régulateur PID est largement employé. Bien que relativement simple, cet algorithme soutient favorablement la comparaison avec des algorithmes plus sophistiqués, tant au point de vue de la performance que de la robustesse de la régulation vis-à-vis de non-linéarités ou variation du procédé. Par ailleurs, ce type d'algorithme est facile à implanter, ce qui plaide en sa faveur à l'époque des régulateurs pneumatiques ou même électroniques. C'est moins vrai aujourd'hui où derrière chaque régulateur se cache un microprocesseur.

Une qualité du PID est qu'il est facile à comprendre donc facile à régler et à maintenir. Ces raisons expliquent pourquoi il est si largement employé, le plus souvent sous la forme PI, l'action D est souvent mise à zéro.

Il existe cependant des cas pour lesquels le régulateur PID n'est pas bien adapté. Nous avons vu que lorsque le procédé a un retard important, les performances sont mauvaises. C'est le cas aussi lorsque le système est oscillant [31].

### **I.12.3. Les avantages et les inconvénients du régulateur PID**

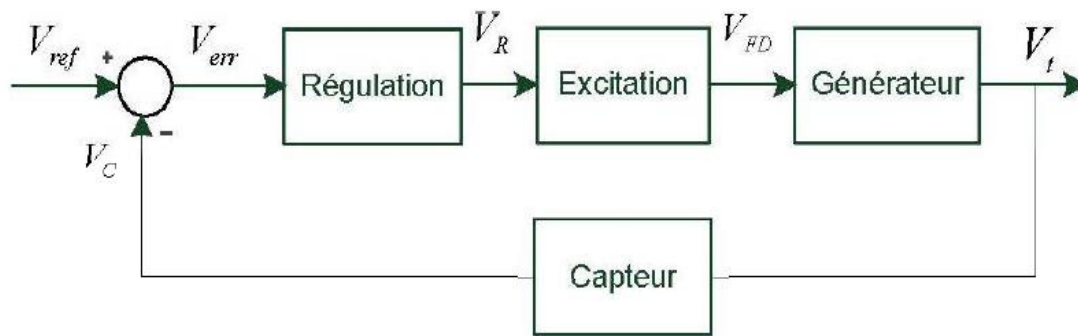
L'asservissement par PID est aujourd'hui l'un des asservissements les plus utilisés et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, il est très simple à mettre en place et s'avère efficace pour la plupart des systèmes réels. De plus, le calcul des coefficients laisse le choix entre plusieurs méthodes de difficulté croissante. D'une part, une méthode expérimentale très facile à mettre en place, permet d'obtenir rapidement des coefficients corrects pour des systèmes ne nécessitant pas de très grandes précisions dans l'asservissement. D'autre part, des méthodes mathématiques avancées offrent des techniques pour obtenir les coefficients idéaux pour un système en particulier. Ainsi, la mise en place d'un asservissement PID peut-être à la fois rapide et efficace et permettra une optimisation des coefficients pour les systèmes les plus avancés.

Cependant, il est important de noter que ce type d'asservissement est limité par un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, il peut s'avérer inefficace pour certains systèmes qui contiennent du bruit (coefficient Dérivé) ou qui ne sont pas linéaires (l'asservissement PID étant linéaire, la non-linéarité d'un système entraîne des instabilités).

Enfin, il est possible d'optimiser la réponse d'un système en multipliant les asservissements (Comme par exemple le double asservissement PID) [32] [33].

### I.13. Régulateur automatique de tension

La sortie de l'AVR dépend uniquement de la tension terminale. Il agit sur l'excitatrice du générateur afin de maintenir la tension terminale constante [14] [34]. La Figure I(15) représente le schéma de principe de la régulation de tension dans une Génératrice.



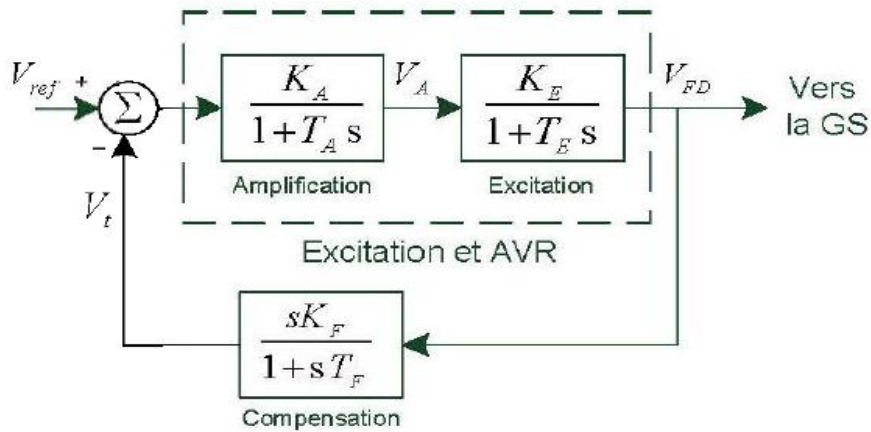
**Figure I.15 :** Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine alternateur  
[14] [34] [35]

#### I.13.1. Régulation et stabilisation de la tension d'excitation

Le régulateur de tension automatique AVR et l'excitatrice constituent principalement le système d'excitation du générateur [14] [35].

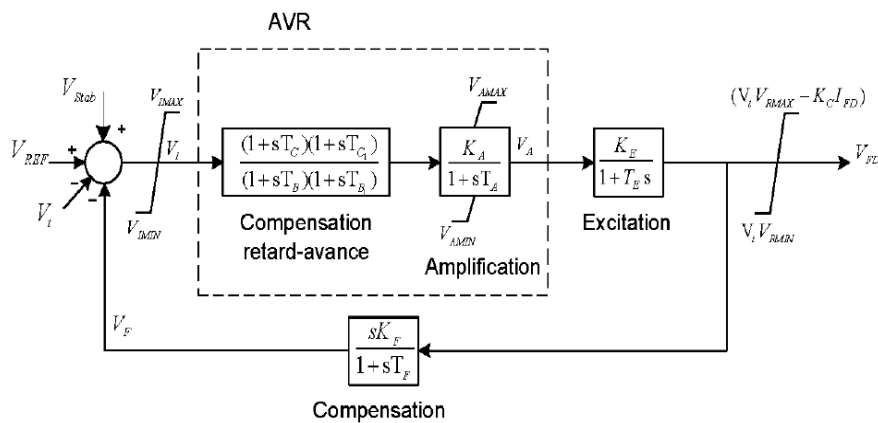
il existe plusieurs types de systèmes d'excitation. Le régulateur de tension a pour entrée la tension de référence qui constitue la consigne, la tension terminale provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation provenant du stabilisateur de puissance et enfin un retour après amortissement (compensation). La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un compensateur de phase puis par le régulateur principal.

Ci-dessous est représenté le système d'excitation statique de type ST1 standardisé par IEEE.



**Figure I.16 :** Système d' excitation type ST1 de IEEE

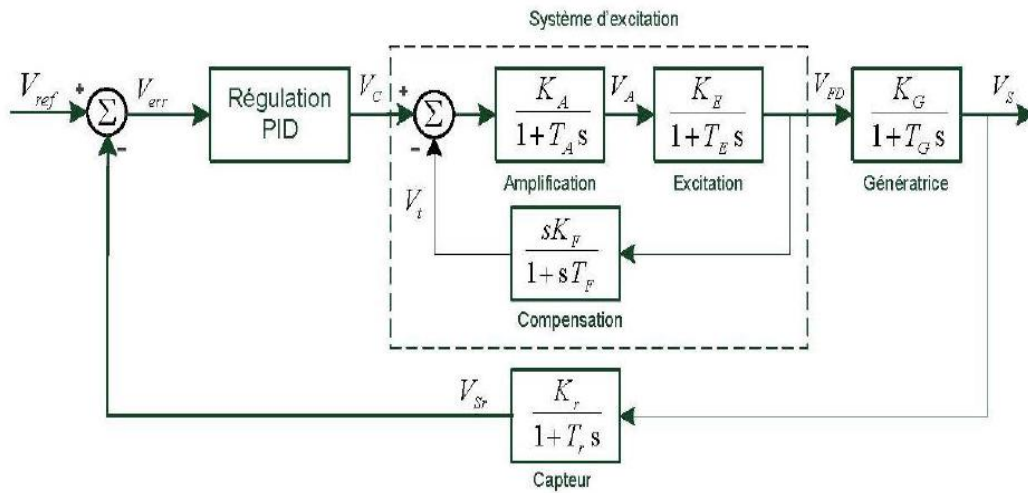
Afin de contrôler la tension d'excitation  $V_{FD}$ , le système simplifié ( $T_C$ ,  $T_{cb}$ ,  $T_B$ , et  $T_{BI}$  sont négligés) peut être représenté comme suit [14] [36] :



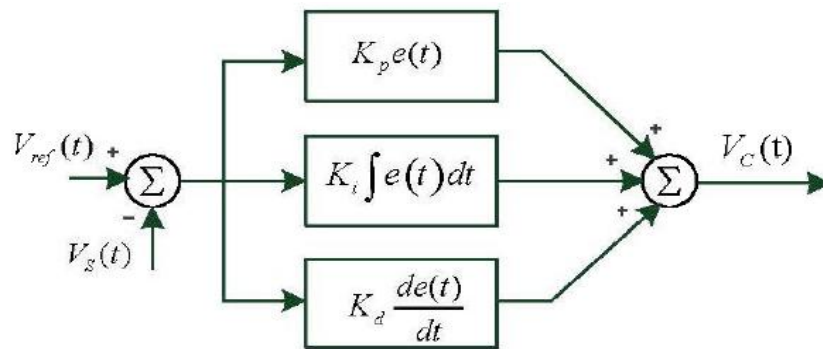
**Figure I.17 :** Régulation et stabilisation de la tension d'excitation

**I.13.2. Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone**

Afin de corriger la tension de sortie de la génératrice  $V_s$ , un régulateur de type PID classique est le plus souvent intégré au système vu son efficacité de donner des réponses plus performantes tellement il associe les trois actions principales (proportionnelle, intégrale et dérivée) [34] [35].



**Figure I.18 :**Régulation de la tension de sortie de la génératrice



**Figure I.19 :**Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique

La tension de sortie corrigée est donnée par :

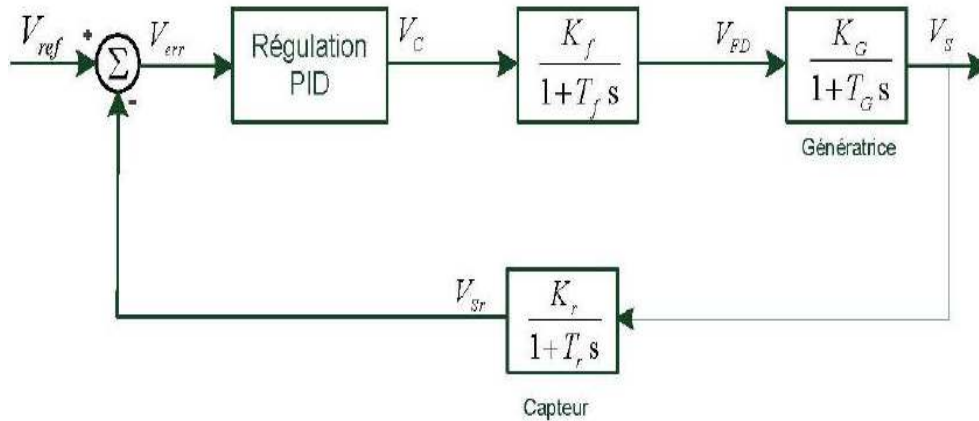
$$V_c(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{I.10}$$

Tel que  $e(t)$  représente l'écart,  $K_p$  le gain proportionnel,  $T_I$  la constante intégrale de temps et  $T_D$  la constante dérivée du temps.

La fonction de transfert du correcteur PID s'écrit alors comme suit :

$$G_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \tag{I.11}$$

✓ **Synthèse des paramètres des correcteurs :**



**Figure I.20 :** Schéma de régulation de tension simplifié

- Méthode par compensation de pôles :

Après simplification du système global précédent Figure I(20), le schéma fonctionnel obtenu montré ci-dessus nous permet de calculer aisément les paramètres du correcteur PID, en utilisant la méthode par compensation de pôles.

La fonction transfert du correcteur PID peut s'écrire sous la forme :

$$G_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_p \left( \frac{1 + T_I s + T_I T_D s^2}{T_I s} \right) \tag{I.12}$$

La fonction de transfert (Excitation + Génératrice) est exprimée comme suit :

$$F_T(S) = \frac{K_f K_G}{(1 + T_f s)(1 + T_G s)} = \frac{K'}{1 + (T_f + T_G)s + T_f T_G s^2} \tag{I.13}$$

Après compensation de pôles par les zéros du correcteur PID, on aura :

$$T_I = T_f + T_G \quad , \quad T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \tag{I.14}$$

En boucle ouverte, la fonction de transfert est exprimée comme :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{BO}}{T_I s} \tag{I.15}$$

Avec :  $K_{BO} = K_p K_f K_G$

En boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)H(s)}{1+G_{BO}(s)H(s)} \quad (I.16)$$

Tel que  $H(s)$  définit la fonction de transfert du capteur qui s'écrit comme suit:

$$H(s) = \frac{K_r}{1+T_r s} \quad (I.17)$$

En remplaçant les équations (I.15) et (I.17) dans (I.16), on déduit la fonction de transfert du système globale en boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{\left(\frac{K_{BO}}{T_{BO}}\right) \left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)}{1 + \left(\frac{K_{BO}}{T_I}\right) \left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_I s}{K_{BO}}\right) \left(\frac{1+T_r s}{K_r}\right)}$$

$$\Rightarrow F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_I}{T_{BO} K_r}\right) s + \left(\frac{T_I T_r}{K_{BO} K_r}\right) s^2} \quad (I.18)$$

La forme canomque d'une fonction de transfert du deuxième ordre est la suivante :

$$F(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right) s + \left(\frac{1}{\omega_n^2}\right) s^2} \quad (I.19)$$

Tel que  $\varepsilon$  et  $\omega_n$  représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système.

Par superposition entre les deux fonctions de transferts  $F_{BF}(s)$  équation (I.18) et  $F(s)$  équation (I.19) on aura :

$$\frac{T_r}{K_{BO} K_r} = \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right) \quad (I.20)$$

$$\frac{T_I T_r}{K_{BO} K_r} = \left(\frac{1}{\omega_n^2}\right) \quad (I.21)$$

$$(I.20) \Rightarrow \omega_n = \frac{2K_{BO} K_r \varepsilon}{T_I} \quad (I.22)$$

$$(I.21) \Rightarrow K_{BO} = \frac{T_I T_r \omega_n^2}{K_r} \quad (I.23)$$

En remplaçant (I.22) dans (I.23), on obtient:

$$K_{BO} = \frac{T_I}{4T_r K_r \varepsilon^2} \quad \text{et Sachant que : } K_{BO} = K_p K_f K_G \quad T_I = T_f + T_G \text{ et}$$

$$T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G}$$

On déduit alors les gains :

$$\begin{cases} K_P = \frac{(T_f+T_G)T_r \omega_n^2}{K_r K_f K_G} \\ \text{ou} \\ K_P = \frac{(T_f+T_G)}{4 K_f K_G K_r T_r \varepsilon^2} \end{cases}, \quad K_I = \frac{1}{T_f+T_G}, \quad K_D = \frac{T_f T_D}{T_f+T_G} \quad (I.24)$$

✓ **Calcul des différents paramètres de chaque fonction de transfert :**

- Fonction de transfert simplifiée de la Génératrice synchrone [14] :

$$G(s) = \frac{K_G}{(1+s.T_G)} \quad (I.25)$$

Le calcul de  $K_G$  et  $T_G$  se fait comme suit :

$$\begin{cases} G(s) = K_G \frac{1+s.T_{kd}}{(1+s.T'_{d_0})(1+s.T''_{d_0})}; \Delta \Phi ds = G(s) * efd \\ K_G = \frac{x_{md}}{r_f}, T'_{d_0} = \frac{x_{md}+x_f+x_{kf1}}{r_f} \end{cases} \quad (I.26)$$

Avec  $x_{kf1} \ll x_f$ ,  $x_{md} \ll x_f \Rightarrow T_G = T'_{d_0} \approx \frac{x_f}{r_f}$

$T_{kd}$  et  $T''_{d_0}$  sont négligées [14].

- Fonction de transfert de l'amplificateur:

$$G_f(s) = \frac{K_f}{(1+s.T_f)} \quad (I.27)$$

La relation entre la tension continue  $V_{SDC}$  obtenue après redressement par le convertisseur commandé, et la tension alternative entre phase  $V_{Sab}$  reçue par le réseau à travers le transformateur d'excitation est donnée comme suit:

$$\overrightarrow{V_{SDC}} = 1.35 \overrightarrow{V_{Sab\_eff}} \cos(\alpha)$$

$$\begin{cases} V_f = 1.35 V_2 \cos(\alpha) = 1.35 K_e V_G \cos(\alpha) \\ V_c = V_{tb} \cos(\alpha) = V_{tb} V_G \cos(\alpha) \end{cases} \quad (I.28)$$

Où:  $V_f$  est la tension d'excitation (en courant continu),  $V_2$  la valeur efficace de la tension secondaire du transformateur utilisé,  $V_c$  tension corrigée à la sortie du régulateur PID, et  $V_{tb}$  définit la tension génératrice maximale ( $V_{base}$ ).

et  $K_e = V_2/V_G$  et  $K_{tb} = V_{tb}/V_G$  représente respectivement le ratio entre excitation/transformateur et le ratio entre génératrice/transformateur [36].

Le gain du  $K_f$  de l'amplificateur est alors calculer comme suit :

$$V_f = 1.35 K_e V_G \frac{V_c}{K_{tb} V_G} = K_f V_c \quad (\text{I.29})$$

On déduit alors,

$$K_f = 1.35 \cdot K_e / K_{tb} \quad (\text{I.30})$$

Et la constant e de temps

$$T_f = \frac{T}{2} = \frac{T_e/6}{2} = \frac{T_e}{12} \quad (\text{I.31})$$

Tels que :

$a$  : Angle d'amorçage des thyristors

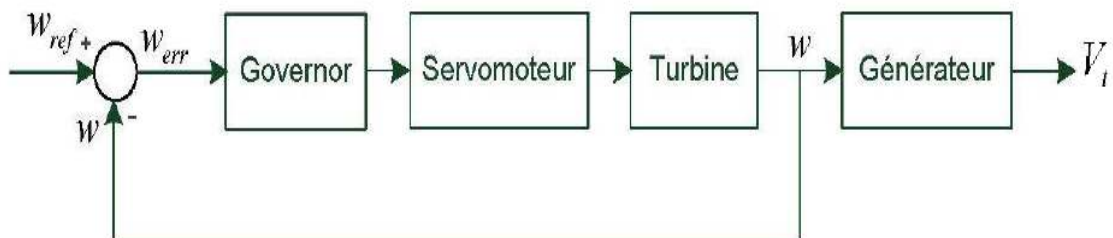
$T$  : Période du single filtré

$T_e$  : Période du single d'entrée

#### I.14. Régulation de la vitesse de rotation

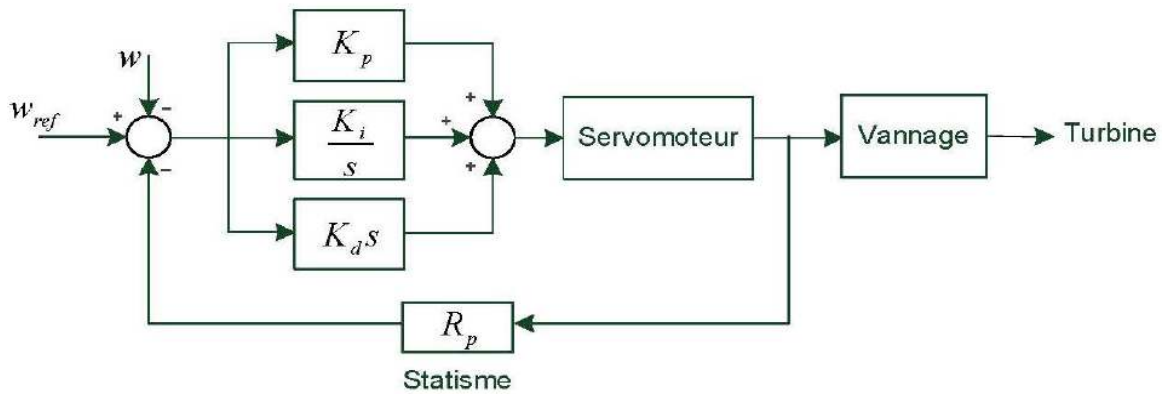
Le schéma ci-dessous Figure I(21) montre le principe de la régulation de la vitesse de rotation et la puissance mécanique d'un groupe turbine hydraulique-alternateur.

La boucle de régulation est composée généralement d'un régulateur (*governor*), d'un servomoteur et d'une turbine.



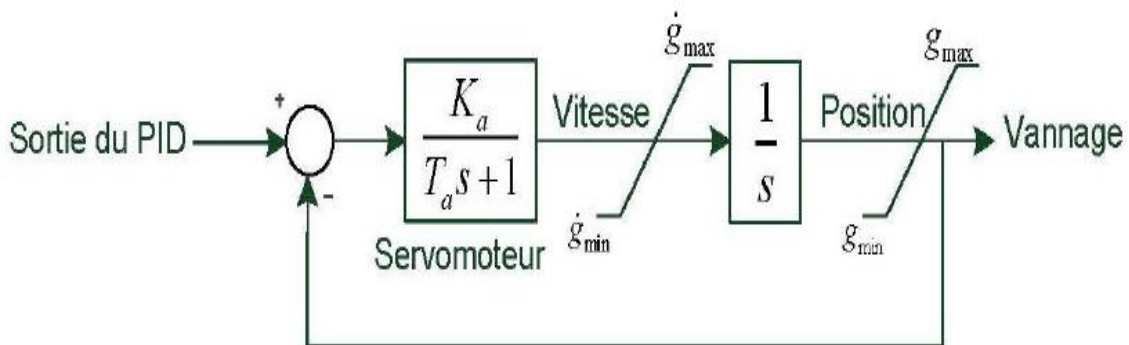
**Figure I.21** : Principe de la régulation de la vitesse

Le régulateur (gouvernor) est souvent représenté par un régulateur classique PID [37] (Proportionnel, intégral et dérivée) dans la Figure I(22). Le PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale. Le statisme a pour rôle le partage de la charge totale du réseau entre différents générateurs s'il y a lieu. Il permet aussi d'assurer le bon fonctionnement de plusieurs turbines dans un réseau électrique.



**Figure I.22 :** Régulateur de vitesse type PID

Le modèle du servomoteur est décrit par une fonction de transfert simple du premier ordre  $\frac{K_a}{T_a s + 1}$  semblable à celle d'un moteur. Il génère la vitesse de rotation de la turbine en commandant l'ouverture du vannage. Il est représenté dans le schéma suivant [38] :



**Figure I.23 :** Schéma bloc du Servomoteur

## **I.15. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art du système c'est-à-dire une étude générale sur les machines synchrones triphasés (constitution, Principe de fonctionnement, caractéristique....), de plus on a donné l'utilisation de ces types des machines, et ses avantages et ses inconvénients, puis nous avons présentés les différentes systèmes d'excitations ainsi une étude profonde sur différents types des correcteurs pour notre système.

# Chapitre II: Modélisation de Système

## II.1. Introduction

La modélisation est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes.

Dans ce chapitre, la modélisation de chaque bloc (génératrice synchrone, moteur diesel). L'objectif de cette partie est d'illustrer chaque modèle indépendamment. Premièrement, le modèle mathématique de la génératrice synchrone est présenté, dans le repère triphasé abc puis dans le repère de Park [14].

Dans la dernière partie, la présentation de quelque notion sur les moteur diesel puis nous avons exposé leur modélisation mathématique.

## II.2. Modélisation de la génératrice synchrone

La machine synchrone considérée dans notre travail représente un alternateur synchrone à pôles saillants, elle est principalement composée de trois enroulements au stator, un enroulement au rotor et deux enroulements amortisseurs.

Après l'application de la transformée de Park aux équations de la génératrice, le modèle mathématique est exprimé en unité réduite (pu) par les équations électriques de tension et de flux ainsi que les équations mécaniques [14].

Dans notre travail, il s'agit en partie de réaliser un contrôle des grandeurs de sortie de la génératrice au niveau du système d'excitation. Le modèle hybride de la génératrice qui est le plus approprié, sera alors développé.

### II.2.1. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc

Les relations entre les flux et courants s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\Phi = L(\theta)i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \Phi_s^{abc} \\ \Phi_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$\Phi_s^{abc} = [\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^T; \quad \Phi_r^{abc} = [\Phi_f \quad \Phi_d \quad \Phi_Q]^T \quad (\text{II.2})$$

$$i_s^{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T; \quad i_r^{abc} = [i_f \quad i_d \quad i_Q]^T \quad (\text{II.3})$$

$$L_{ss}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix} ; L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Et les équations de tensions sont écrites comme suit :

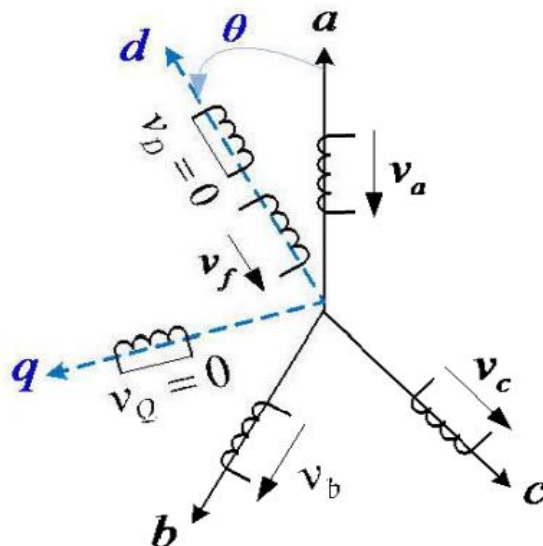
$$V = RI + \frac{d}{dt}(\Phi) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_s^{abc} \\ \Phi_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Telle que :

$$v_s^{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^T ; v_r^{abc} = [v_f \ 0 \ 0]^T \quad (\text{II.6})$$

$$R_s = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \text{ et } R_r = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{pmatrix} V_s^{abc} \\ V_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \right) \quad (\text{II.8})$$

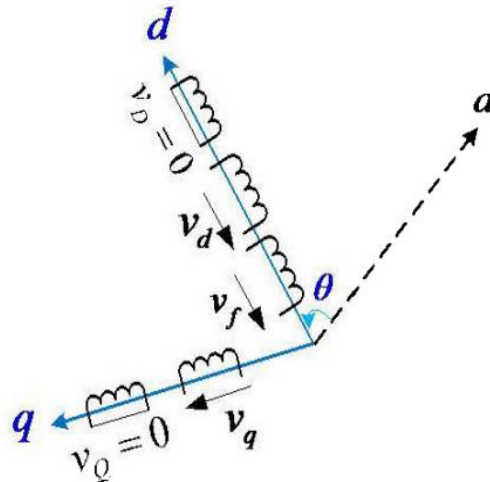


**Figure II .1 :**Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc)

### II.2.2. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park ( $dqO$ ) :

La transformation de Park définit une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe ( $abc$ ) vers le repère mobile ( $dqO$ ), afin de simplifier le modèle du système vu la complexité de l'étude du système.

Les enroulements au niveau du stator (repère  $abc$ ) sont alors remplacés par deux enroulements ( $dqO$ ) en quadrature .



**Figure II .2 :** Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel  $dqO$ )

La matrice de passage  $P$  est notée comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La matrice inverse  $P^{-1}$  sera alors :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

L'application de la transformation de Park se fait comme suit :

$$[I_{dq0}] = P[I_{abc}] = [i_d \ i_q \ i_0]^T \quad (\text{II.11})$$

$$[\Phi_{dq0}] = P[\Phi_{abc}] = [\Phi_d \quad \Phi_q \quad \Phi_0]^T \quad (\text{II.12})$$

$$[V_{dq0}] = P[V_{abc}] = [v_d \quad v_q \quad v_0]^T \quad (\text{II.13})$$

Et les équations obtenues sont données par :

✓ Équations de flux :

$$\begin{pmatrix} \Phi_s^{dq0} \\ \Phi_r^{dq0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{dq0} & L_{sr}^{dq0} \\ -\frac{3}{2}(L_{sr}^{dq0})^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Telles que :

$$L_{ss}^{dq0} = P(L_{ss}^{abc}(\theta))P^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & L_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{00} \end{bmatrix}; L_{sr} = PL_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af0} & L_{ad0} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq0} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

✓ Équations des tensions :

A partir de la formule des tensions dans le repère  $abc$  dans l'équation (II.8). Les tensions au niveau du stator peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} v_s^{dq0} \\ v_r^{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3.3} \\ 0_{3.3} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Phi_s^{dq0} \\ \Phi_r^{dq0} \end{bmatrix} + \omega_m W \begin{bmatrix} \Phi_s^{dq0} \\ \Phi_r^{dq0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec :} \quad \omega_m = \frac{d\theta}{dt}; \quad W = \begin{bmatrix} J & 0_{3.3} \\ 0_{3.3} & 0_{3.3} \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La conversion des équations en valeur relative (pu) permet de faciliter le calcul et l'évaluation du modèle mathématique plus aisément. Après avoir introduits les valeurs de références ( $V_{sréf}$ ,  $I_{sréf}$ ,  $S_{sréf}$ ,  $\omega_{sréf}$ , ...) de chaque grandeur, les résultats alors obtenus sont donnés en valeur réduite (pu) dans les équations suivantes :

✓ Expression des flux en pu :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$X_{SS} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \end{bmatrix}; X_{rr} = \begin{pmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{QQ} \end{pmatrix}; X_{sr} = \begin{bmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Telles que les réactances mutuelles sont calculées comme suit :

$$x_d = x_{md} + x_a; \quad x_q = x_{mq} + x_a; \quad x_0 \approx x_a \quad (\text{II.20})$$

$$x_{ff} = x_{md} + x_{kf_1} + x_f; \quad x_{DD} = x_{md} + x_D + x_{kf_1}; \quad x_{QQ} = x_{mq} + x_Q;$$

$$x_{df} = x_{fd} = x_{md}; \quad x_{dD} = x_{Dd} = x_{md}; \quad x_{Qq} = x_{qQ} = x_{mq};$$

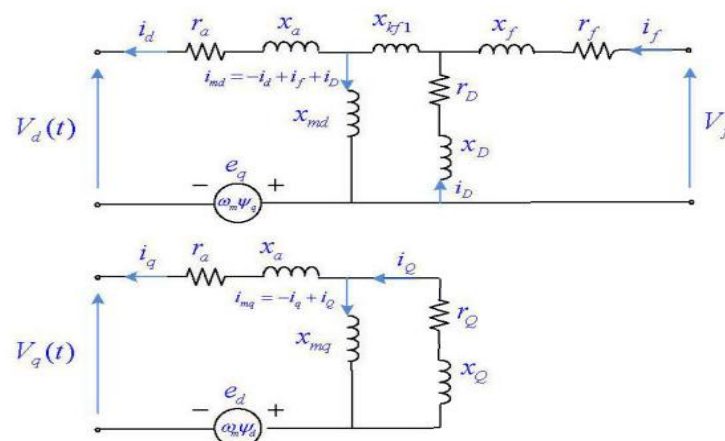
$$x_{fD} = x_{Df} = x_{DD} - x_D = x_{md} + x_{kf_1}$$

✓ Expression des tensions en pu :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \omega_n = \omega_{réf} = 2\pi f_{réf} . \quad (\text{II.22})$$



**Figure II.3 :** Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu)

Pour obtenir une modélisation complète de la machine, nous adjoignons aux équations électriques, l'équation mécanique de la machine régie par la relation suivante :

$$2H \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m - T_e - D\omega_m \quad (pu) \quad (\text{II.23})$$

Le couple électromagnétique en pu est calculé par :

$$T_e = (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (\text{II.24})$$

### II.3. Moteurs à combustion interne

Les types d'entraînement les plus couramment employés dans les véhicules sont les moteurs à combustion interne. Ils développent leur puissance en convertissant en chaleur l'énergie chimique contenue dans le carburant, puis en transformant cette chaleur en travail mécanique. La conversion de l'énergie chimique en chaleur s'effectue par combustion et transformation de l'énergie calorifique en travail mécanique par l'action de celle-ci sur un fluide moteur dont la pression augmente tout d'abord et dont la détente successive produit un travail.

Les fluides moteurs envisageables sont les liquides qui, par vaporisation, accroissent la pression de travail ou les gaz dont la pression de travail peut être augmentée par compression. La combustion des carburants, généralement composés d'hydrocarbures, requiert de l'oxygène normalement introduit avec l'air d'admission. Si la combustion s'effectue dans la chambre de travail, il s'agit d'une combustion interne. Dans ce cas, les gaz de combustion servent directement de fluide moteur.

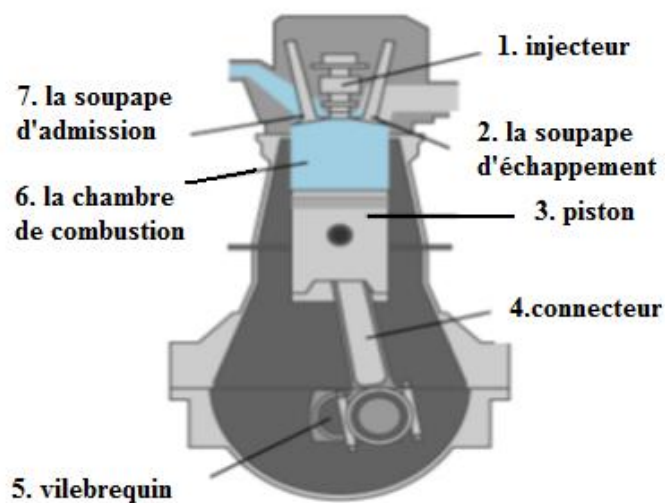
Une production continue de travail mécanique ne peut s'obtenir que par un processus cyclique (moteur à pistons) ou par un processus continu d'absorption de chaleur, de détente (production de travail) et de retour du fluide moteur à son état initial (cycle de fonctionnement).

Si le fluide moteur est modifié lors de l'absorption de chaleur, par exemple par l'utilisation d'une partie de ses composants comme agents d'oxydation, il ne peut retrouver son état initial que par remplacement. Ce processus est appelé «cycle ouvert» et se caractérise par un remplacement cyclique des gaz (élimination des gaz de combustion et introduction d'une charge fraîche); C'est pourquoi la combustion interne nécessite toujours un cycle ouvert [39]

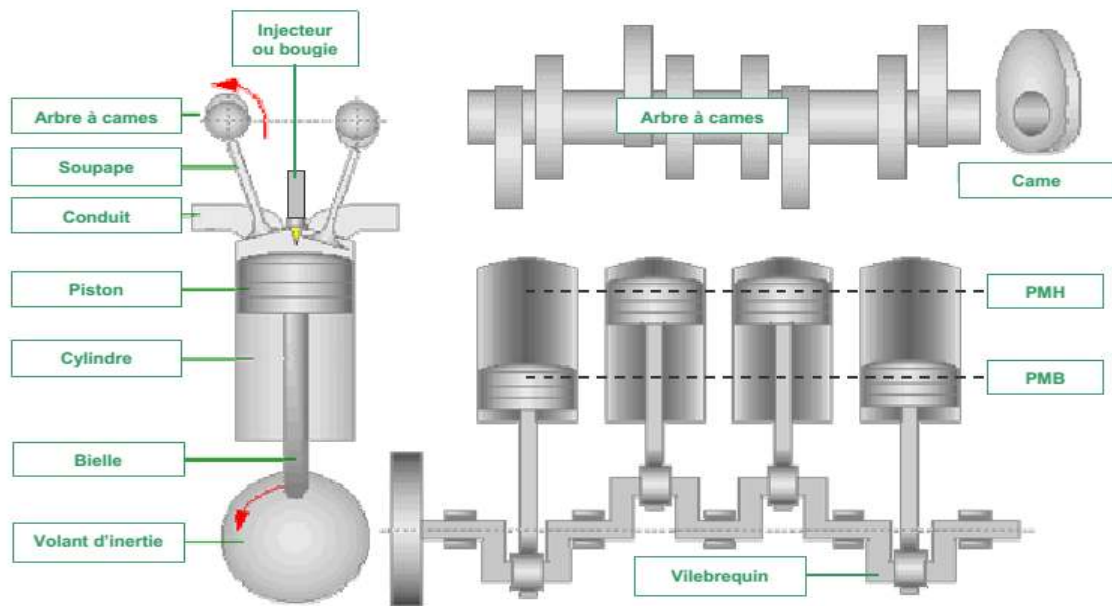
### II.3.1. Le moteur diesel

L'élément principal dans la construction du groupe diesel est le moteur diesel. On peut se considérer que les premières automobiles furent créées en 1890 construit avec un moteur allemand de Daimler. Mais en 1892 que M. Rudolf Diesel invente le moteur diesel .Il s'agit d'un moteur à allumage par compression ayant un rendement plus élevé que les machines à vapeur et les moteurs à essence à l'époque. Les premiers moteurs diesel rejoignent le monde de l'industrie sont reliés plus précisément avec le marché d'automobile dans les années 1920.

La combustion dans les moteurs diesel s'effectue avec un mélange hétérogène composé d'air et de carburant diesel. Ce mélange est favorable à l'auto-inflammation et n'a donc pas besoin d'étincelle pour s'enflammer. Au début, le diesel est injecté dans le cylindre au moyen d'une pompe à air mais avec les évolutions de la technologie, le carburant est injecté au moyen d'un système haut pression qui pulvérise le carburant .La Figure II(4) montre les différents composants d'un moteur diesel [40].



**Figure II.4 :**Les éléments du moteur diesel [40].



**Figure II.5 :** Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons [39]

### II.3.2. Cycle du moteur

Dans le cadre de notre étude nous utilisons un moteur diesel à quatre temps, à savoir qu'un cycle moteur (correspondant à une rotation de  $2 \times 360^\circ$ ) comporte les quatre phases suivantes (cf. Figure II.6):

#### ADMISSION :

- Le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre.
- L'air frais s'engouffre dans le cylindre.

#### COMPRESSION :

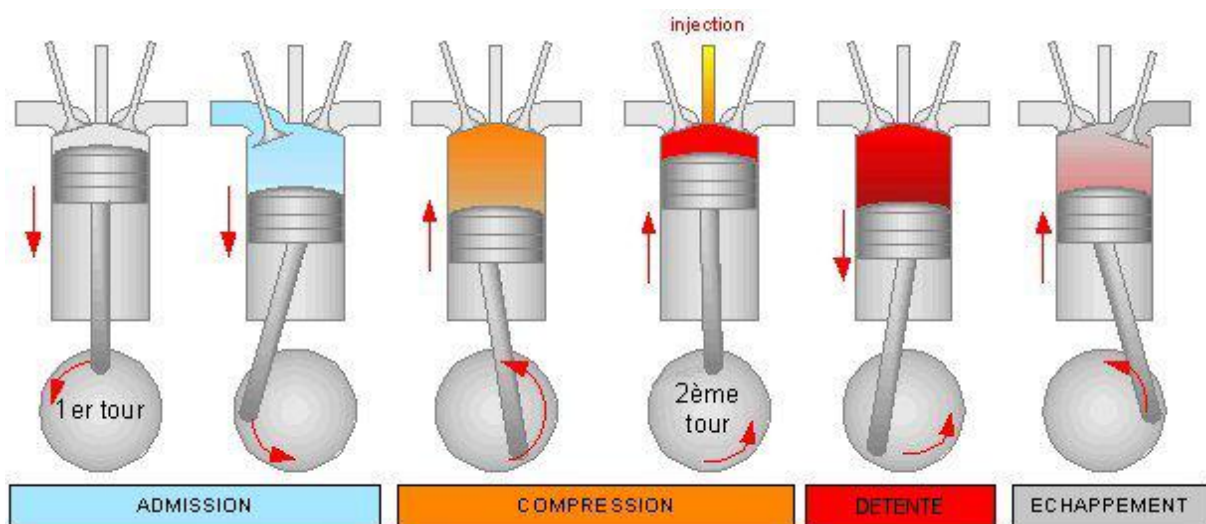
- La soupape d'admission se ferme et le piston remonte.
- L'air est comprimé et s'échauffe fortement.
- Lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course environ, une quantité définie de carburant est injectée.

**DETENTE :**

- Les soupapes sont fermées.
- Le mélange d'air et de carburant contenu dans le cylindre est sous pression.
- La température est suffisamment élevée pour que ce mélange brûle en créant une surpression qui pousse le piston vers le bas.

**ECHAPPEMENT :**

- La soupape d'échappement s'ouvre.
- Le piston remonte chassant les gaz brûlés vers la sortie d'échappement.



**Figure II.6 :** Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps [39].

Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres (soit 4 pistons), chacun des pistons effectue les 4 phases décrites précédemment et est décalé de  $180^\circ$  (angle vilebrequin) par rapport au piston avoisinant. Par exemple (cf. figure II.5), pendant que le premier piston est en fin de phase d'admission, le deuxième est en fin de phase de compression (début de détente), le troisième en fin de phase d'échappement et le quatrième en fin de phase d'explosion (début d'échappement) [41].

### II.3.3. Modélisation du moteur diesel

La modélisation du moteur diesel doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie,  $P_{i-DE}$ , et les puissances résistantes,  $P_{diss-DE}$ . Or, le moteur fonctionne à régime constant (pour une charge donnée) afin de maintenir constantes la tension et la fréquence du courant fourni par l'alternateur. Le principe de la conservation d'énergie s'écrit alors comme suit [40]:

$$P_i - P_{diss} = 0 \quad (\text{II.25})$$

La puissance fournie peut être représentée par l'expression suivante :

$$P_i = p_{ci} \cdot n_i \cdot m_f \quad (\text{II.26})$$

Avec:

$p_{ci}$ : Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

$n_i$ : Le rendement indiqué du moteur.

$m_f$ : Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipé totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur, celle de la génératrice. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{diss} = p_{mf} \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega + C_r \cdot \omega \quad (\text{II.27})$$

$p$ : La pression moyenne des pertes par frottement.

$C_y$ : La cylindrée totale du moteur.

$C_r$ : Le couple résistant dû à la charge appliquée.

La modélisation des frottements au niveau des différents éléments du moteur a fait l'objet de nombreux travaux qui aboutissent à des formes très variées. Vu la complexité pour traiter chaque élément à part, il a été préféré d'utiliser les formules d'évaluations globales de ces pertes. La formule la plus précise qui représente la variation de la puissance de frottement en fonction du régime et de la pression d'air à l'admission du moteur s'écrit comme suit :

$$p_{mf} = \left(1 + \omega \cdot S_{eng} \cdot \left(K_{f1} + K_{f2} \frac{P_{in}}{P_a}\right) + K_{f3} \omega^2\right) P_a \cdot \frac{c_y}{4\pi} \omega \quad (\text{II.28})$$

### II.3.4. Production du couple mécanique

Le moteur diesel est un ensemble technique très hétérogène. En se focalisant sur la dynamique du couple mécanique en rapport avec l'index du système de pompe de carburant, la turbine diesel peut être réduite à un système du premier ordre caractérisé par un gain statique et une constante de temps. Les mesures pratiques montrent la présence d'un retard du fait de l'intervalle existant entre deux explosions. On en déduit l'expression (II.29) qui représente la dynamique du couple mécanique  $T_{Dm}$  écrit dans le plan de Laplace. La variable  $z(s) = L[z(t)]$  est l'équivalent dans le plan de Laplace de l'index d'alimentation,  $T_{D1}$  est une constante de temps exprimant la limite en vitesse de réaction de la turbine, et la constante de temps  $T_{D2}$  exprime le délai de changement de couple [41].

$$T_{Dm}(s) = \frac{K_{Dm}}{1+sT_{D1}} z(s) e^{-sT_{D2}} \quad (\text{II.29})$$

En normalisant l'équation (II.29), on a  $z(t) \in [0, 1]$ .  $z(t)=1$  correspond au fonctionnement en pleine puissance. Pour ce régime, on a une couple mécanique  $T_{Dm}=1$  pu et on en déduit que  $K_{Dm}=1$  pour une équation normalisée. L'index d'alimentation permet d'évaluer la dynamique du débit de carburant dans la turbine moyennant une fonction caractéristique  $p(t) = f(z(t))$  [g/kWh]. La fonction de débit de carburant est non linéaire, convexe, avec un minimum absolu en  $z(t) = 1$ .

En appliquant la transformation de Padé du premier au retard temporel  $e^{-sT_{D2}}$  de l'expression (II.29), on a l'expression (II.30). En exploitant la transformation en forme canonique observable. Une telle transformation est particulièrement appréciée pour l'analyse des valeurs propres et l'élaboration des stratégies de commande à partir de l'observation des valeurs propres [41].

$$e^{-sT_{D2}} \sim \frac{2-sT_{D2}}{2+sT_{D2}} \implies T_{Dm}(s) = \frac{1}{1+sT_{D1}} \frac{2-sT_{D2}}{2+sT_{D2}} z(s) \quad (\text{II.30})$$

## **II.4. Conclusion :**

La modélisation dans l'espace d'état des machines électriques est souvent nécessaire pour pouvoir appliquer les techniques. Donc ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine synchrone et le moteur diesel. En un premier temps le modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc. Par la suite nous avons procédé à la transformation de Park qui permette de simplifier la modélisation du système, puis on a cité les principes de fonctionnement des moteurs diesels, ainsi que modélisation de ce dernier. Et finalement la production du couple mécanique.

# Chapitre III: Simulation de Système

### III.1. Introduction

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur.

Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

### III.2. Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™

*MATLAB* est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement *SIMULINK*, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Des modules temps réel, développés autour des produits *dSPACE* (*Real Time Interface*, *TRACE*, *COCKPIT*) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

#### III.2.1. Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc....., il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif,

L'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (*programmes*) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer

ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à *MATLAB* un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement *MATLAB* peut facilement étendu. Dans *MATLAB*, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le fortran. *MATLAB* s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire *MATLAB* est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. *MATLAB* est une abréviation de *MATrix LABORatoire*. écrit à l'origine, en Fortran, par *Cleve Moler*, *MATLAB* était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets *LINPACK* et *EISPACK*.

### III.2.2. Simulink

(*SIMULINK*) est un programme pour la simulation des systèmes dynamique linéaires et non linéaires ; une (*MATLAB*), dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre- réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. *SIMULINK* possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. *SIMULINK* est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (*librairies*) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau.

### III.3. Avantage de la simulation numérique

Grâce aux performances des logiciels par exemple *Matlab*, *Matrix*, *Syssi*,..., nous permet de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permet aussi de :

- Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- Simuler les entrées.
- Enregistrer les grandeurs significatives.
- Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une imprimante en mode graphique.

Dans cette étude nous avons utilisé le *MATLAB/SIMULINK* comme moyen de simulation de notre système.

### III.4. Description

Dans les grands alternateurs, le système d'excitation est assuré par une petite machine synchrone connectée sur le même arbre que la machine synchrone principale. Le redressement du courant est effectué par un pont de diodes rotatif monté sur l'arbre de la machine synchrone, évitant ainsi les bagues collectrices pour fournir une alimentation en courant continu au champ de la machine synchrone. Le couplage mécanique de la machine synchrone et de l'excitatrice est effectué en utilisant la vitesse comme entrée mécanique de la machine excitatrice. La machine synchrone est une machine de 2 MVA, 400V, 50 Hz, 1500 trs/min entraînée par un moteur diesel. Un courant de champ nominal ( $I_{fn}$ ) de 100 A spécifié dans les paramètres du masque permet d'utiliser la tension réelle appliquée au rotor (et non la tension de champ vue du stator). Il en résulte une tension de champ nominale de 9,2837 V. L'Exciter est une petite machine synchrone de 8,1 kVA, 400 V, 50Hz, 1500 tr/min. Un transformateur 400 V / 12 V permet d'adapter la tension de sortie 400 V de l'excitatrice au redresseur. Dans la vie réelle, ce transformateur ne serait pas utilisé. Au lieu de cela, la tension de sortie de l'excitateur serait plutôt de 12 V. La sortie du pont redresseur est directement connectée aux bornes de la machine synchrones. Le filtrage n'est pas nécessaire en raison de la grande inductance du champ. La tension aux bornes de champ du modèle de machine synchrone est

mesurée dans le sous-système. Ce sous-système est requis pour l'interface de l'entrée  $V_f$  *Simulink*® de la machine synchrone et des terminaux de terrain réels. Il utilise une source de courant entraînée par la sortie de courant continu du pont qui correspond également au courant de champ continu. La tension apparaissant sur cette source de courant correspond à la tension de champ qui doit être appliquée à l'entrée de la machine synchrone  $V_f$ . La régulation de tension est réalisée en contrôlant la tension de champ de l'excitatrice. Ceci est effectué par le bloc "Régulateur de tension" (*type PI*) qui compare la tension mesurée (tension de séquence positive) à une référence  $1 pu$ . Le moteur diesel et la régulation de vitesse sont modélisés dans le sous-système connecté à l'entrée  $P_m$ . Le moteur diesel doit fournir la puissance mécanique totale requise par la machine synchrone principale et l'excitatrice.

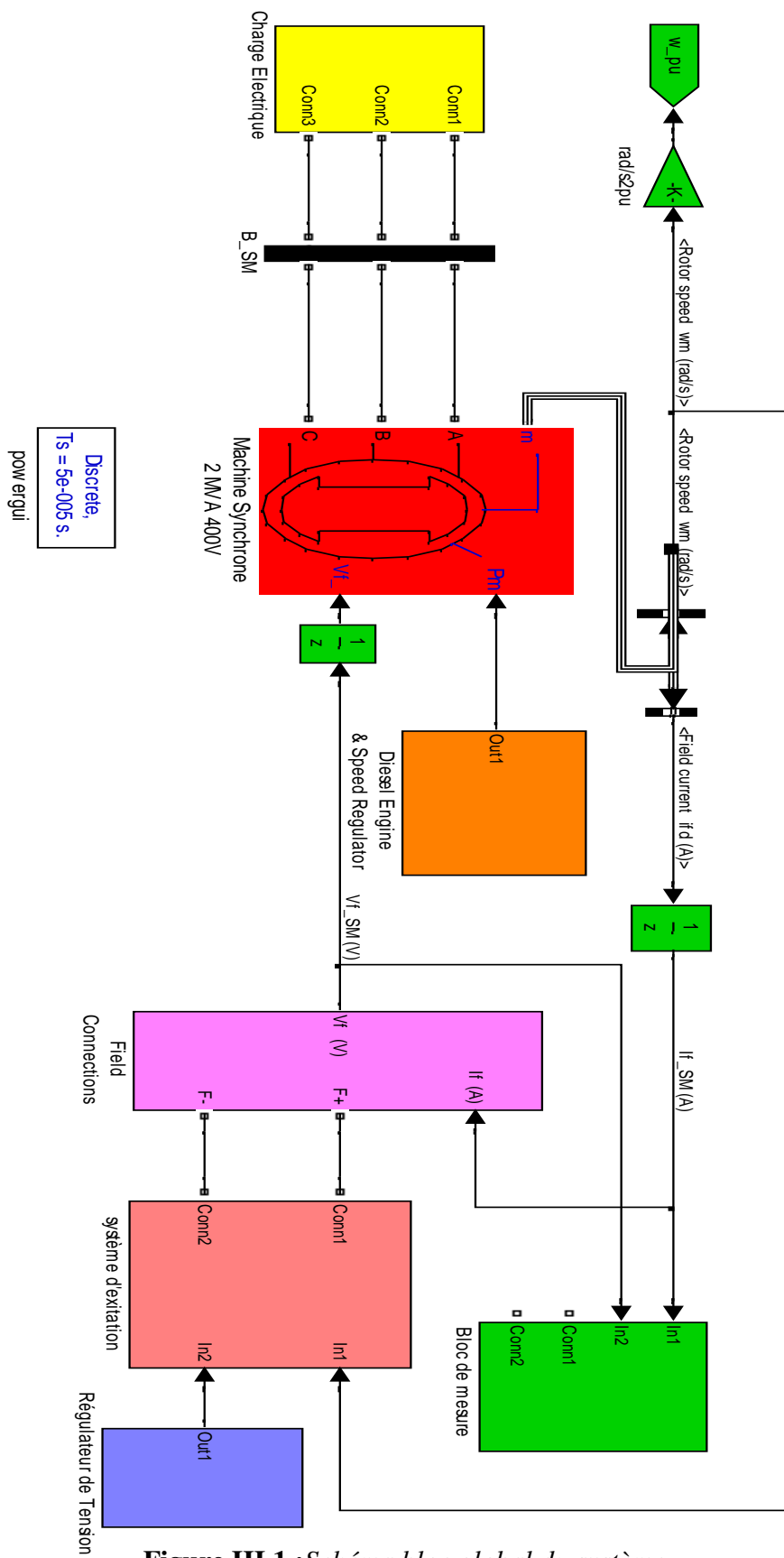


Figure III.1 :Schéma bloc global du système.

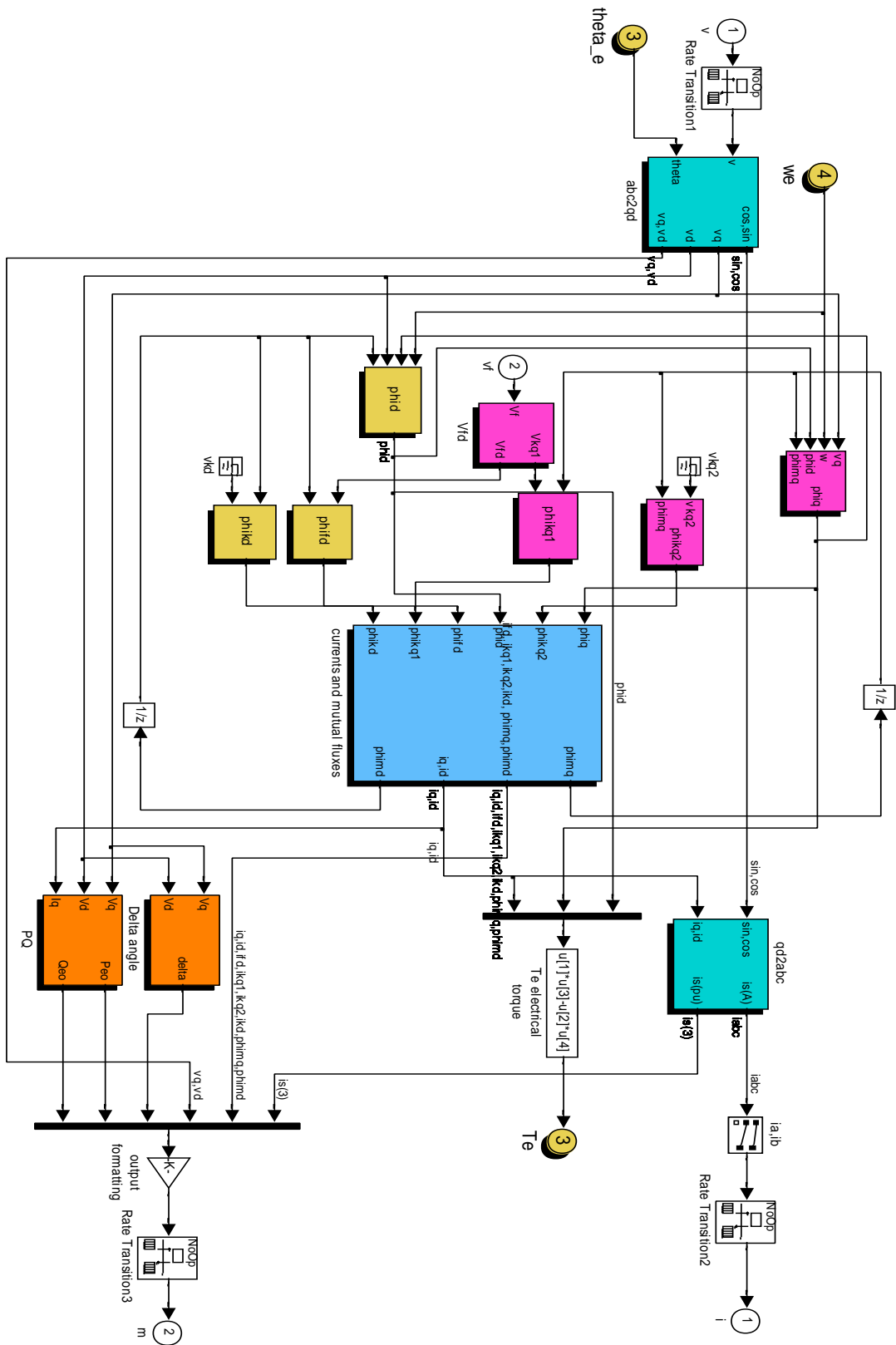


Figure III.2 :Modèle électrique de la machine synchrone

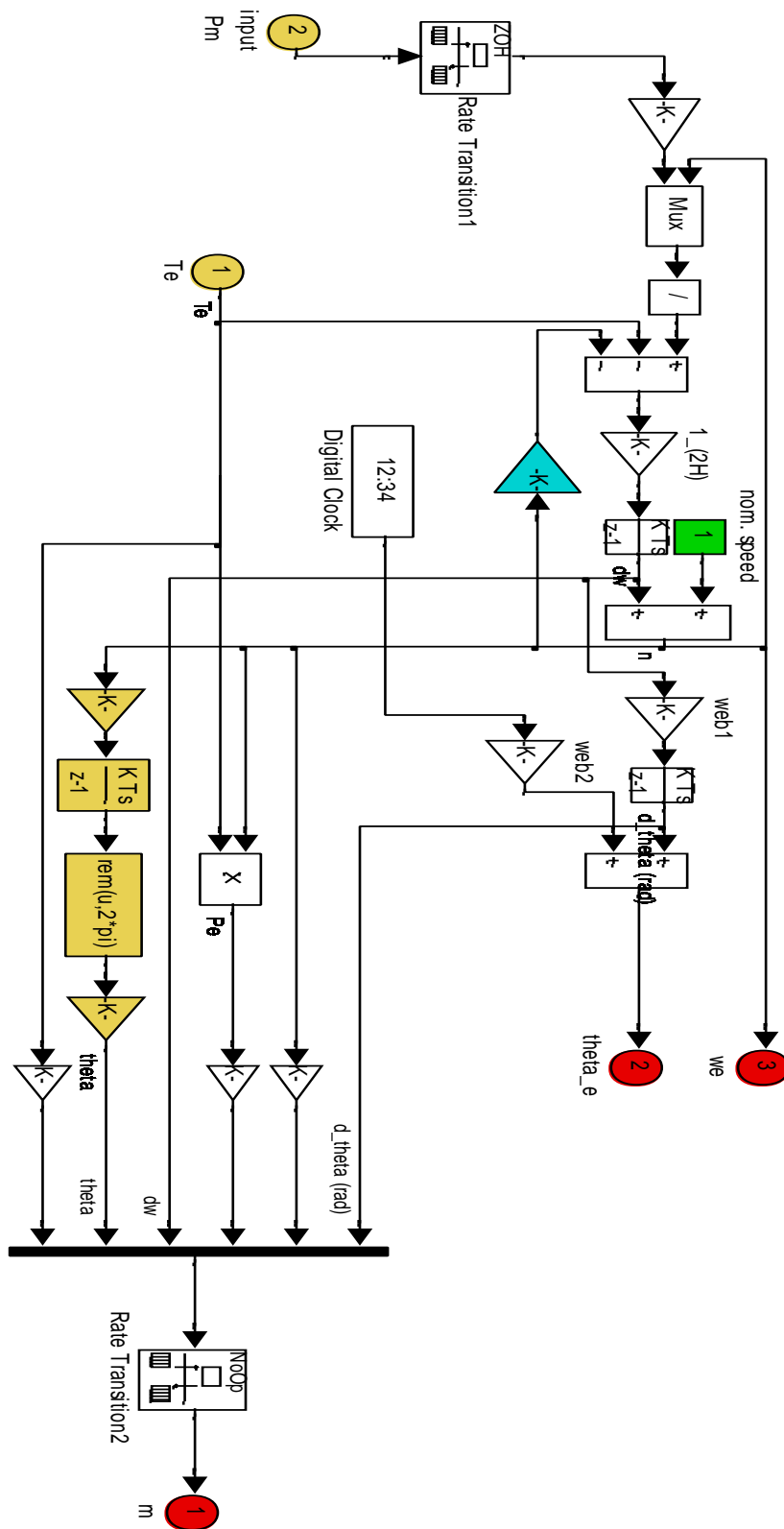


Figure III.3 :Modèle mécanique de la machine synchrone

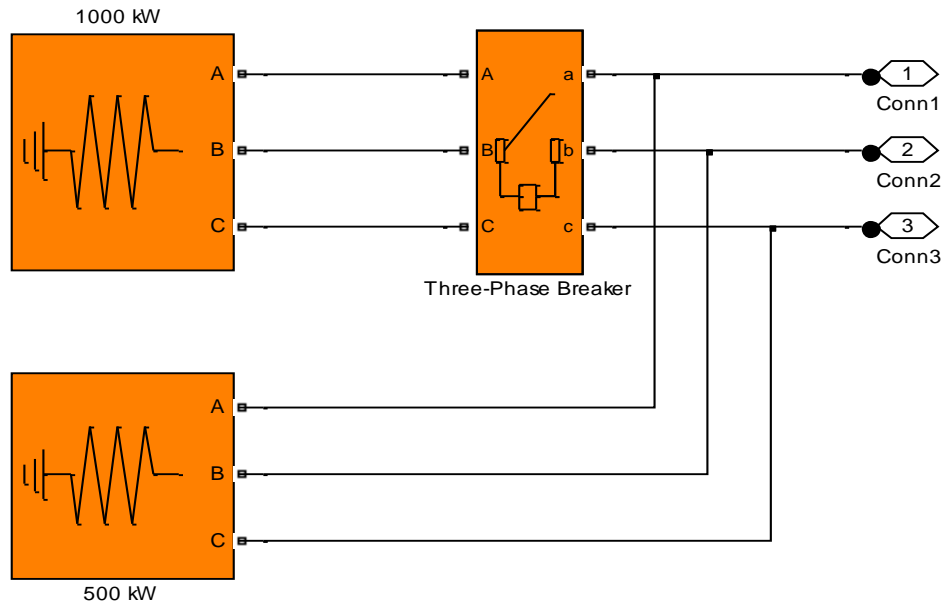


Figure III.4 :Bloc de la Charge électrique

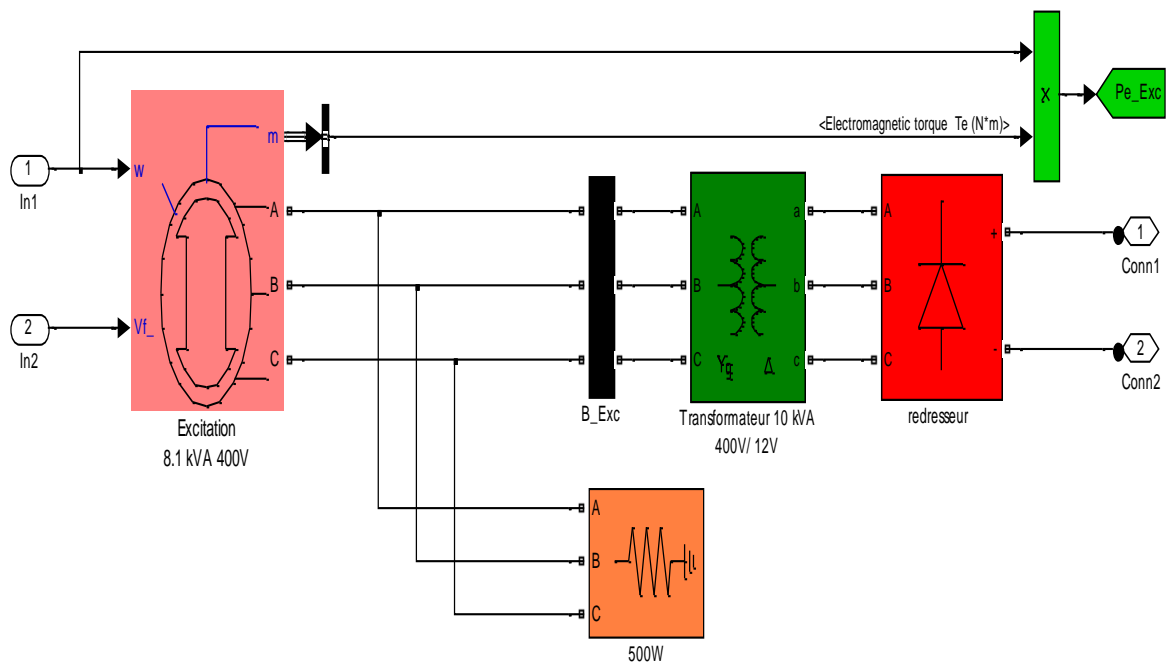


Figure III.5 :Bloc du système d'excitation

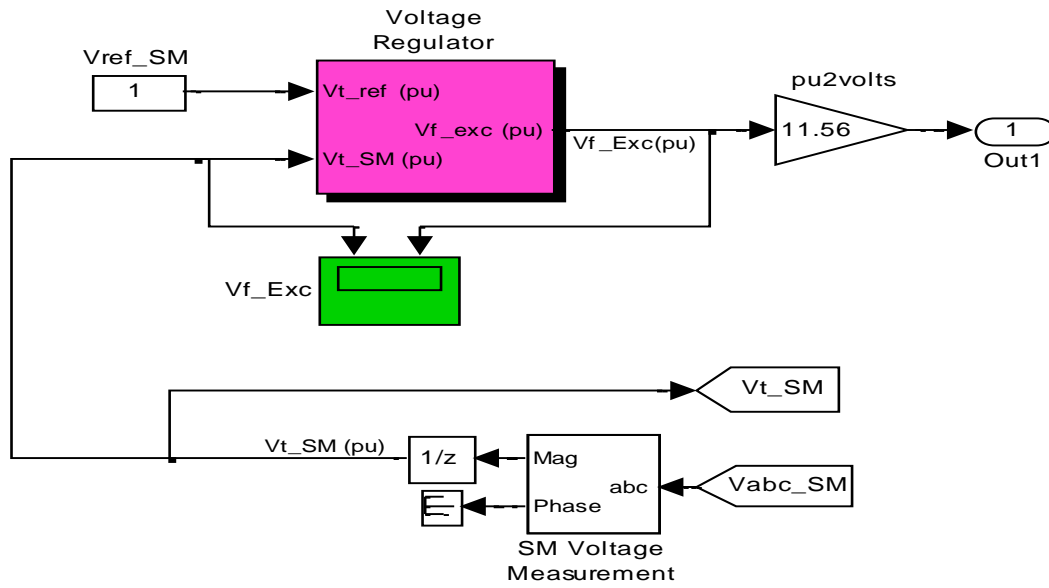


Figure III.6 :Bloc du régulateur de tension

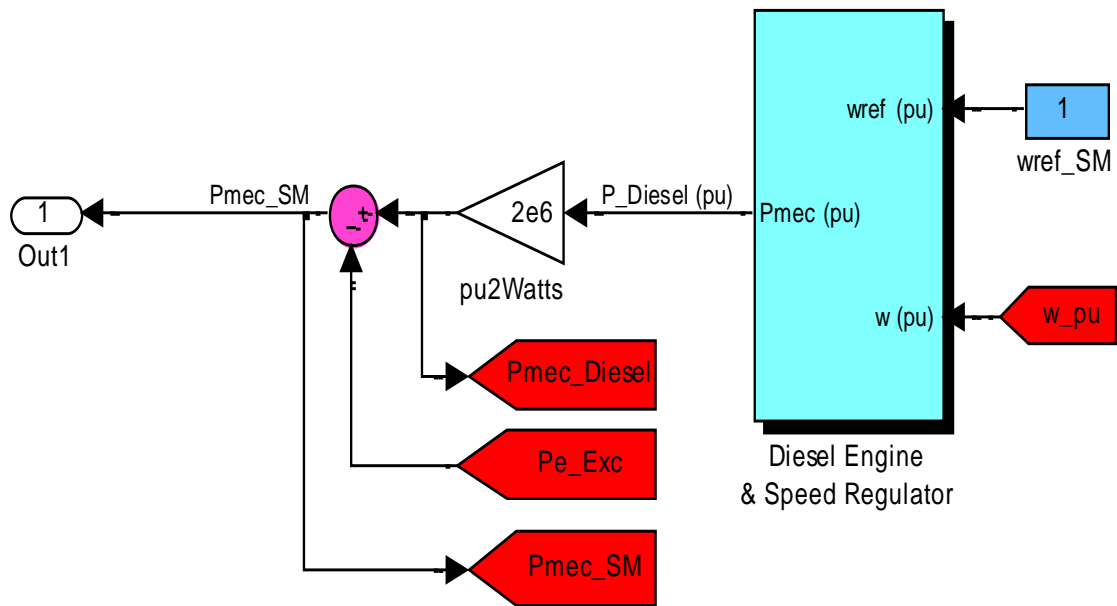


Figure III.7 :Bloc de la régulation de vitesse et le moteur diesel

### III.5. Les résultats de simulation

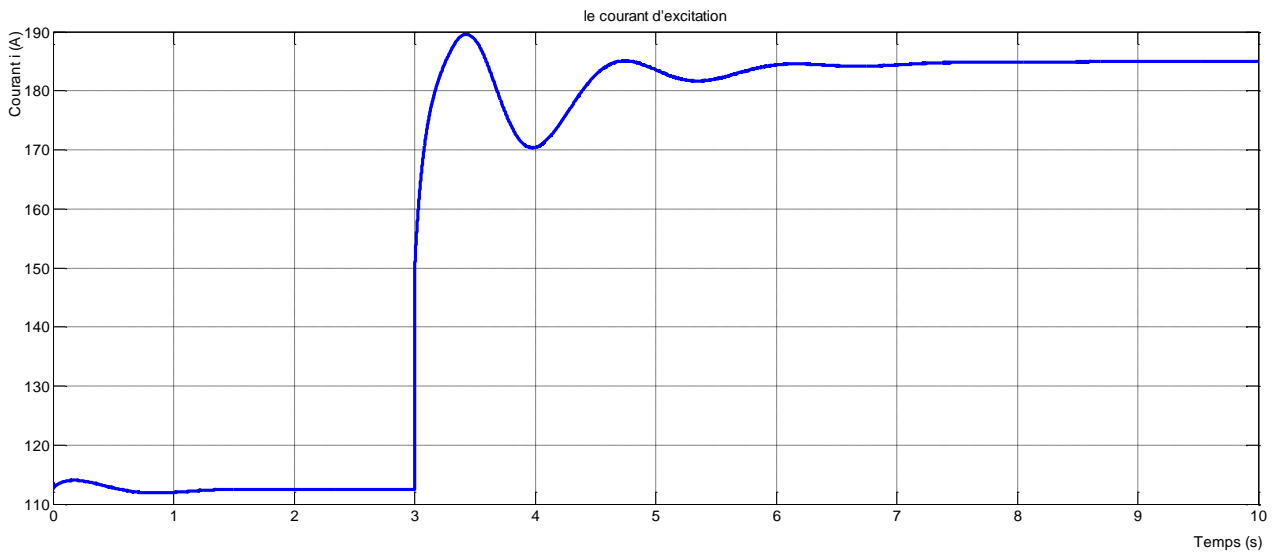


Figure III.8 :le courant d'excitation

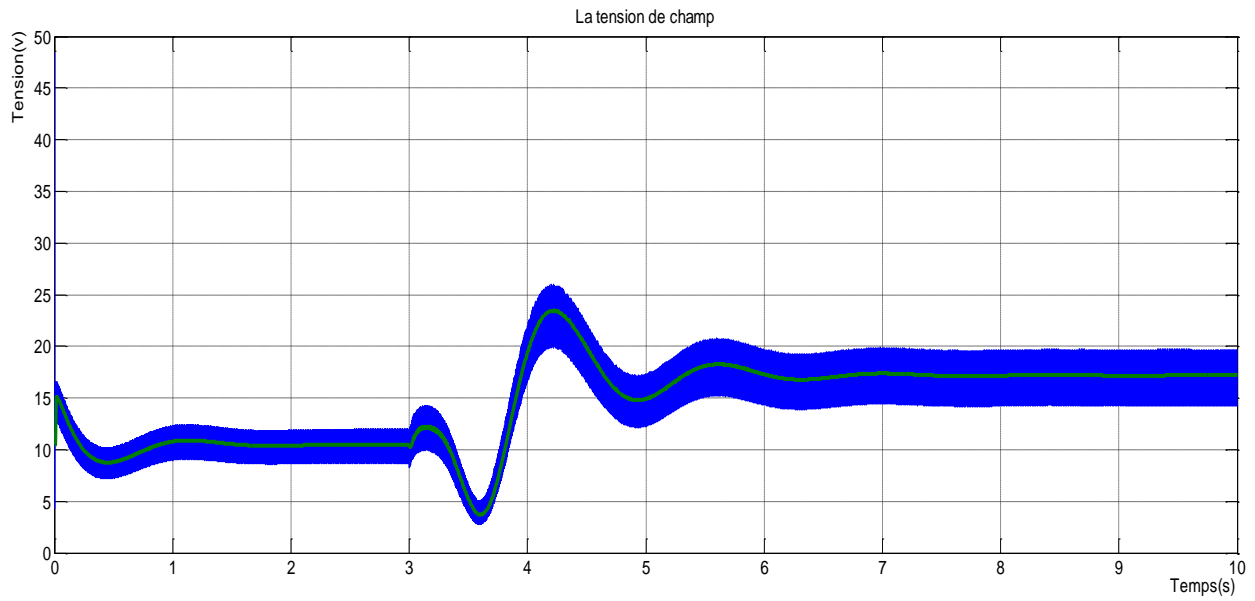
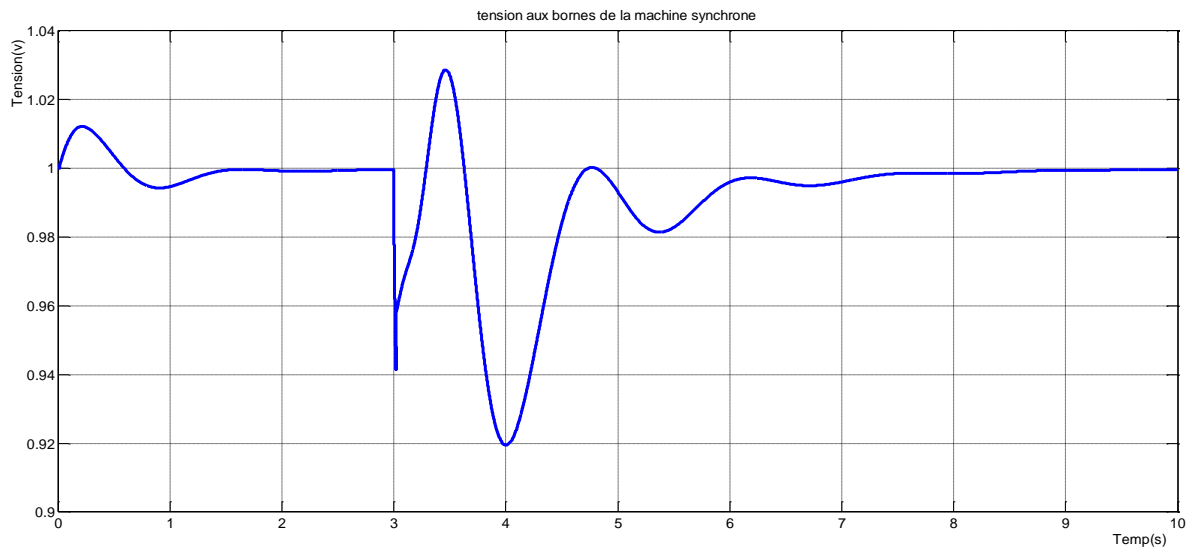
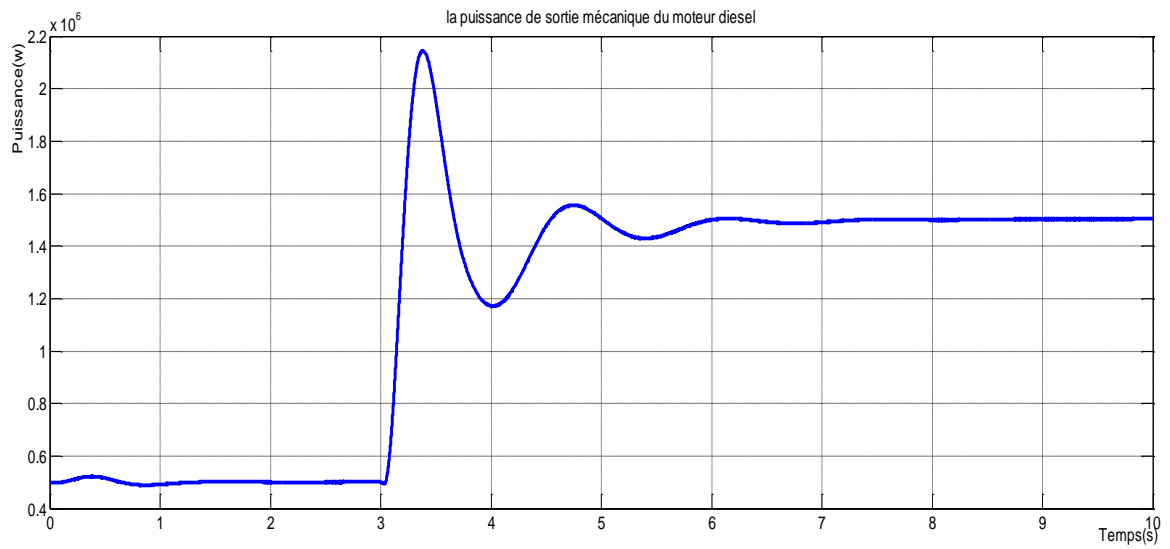


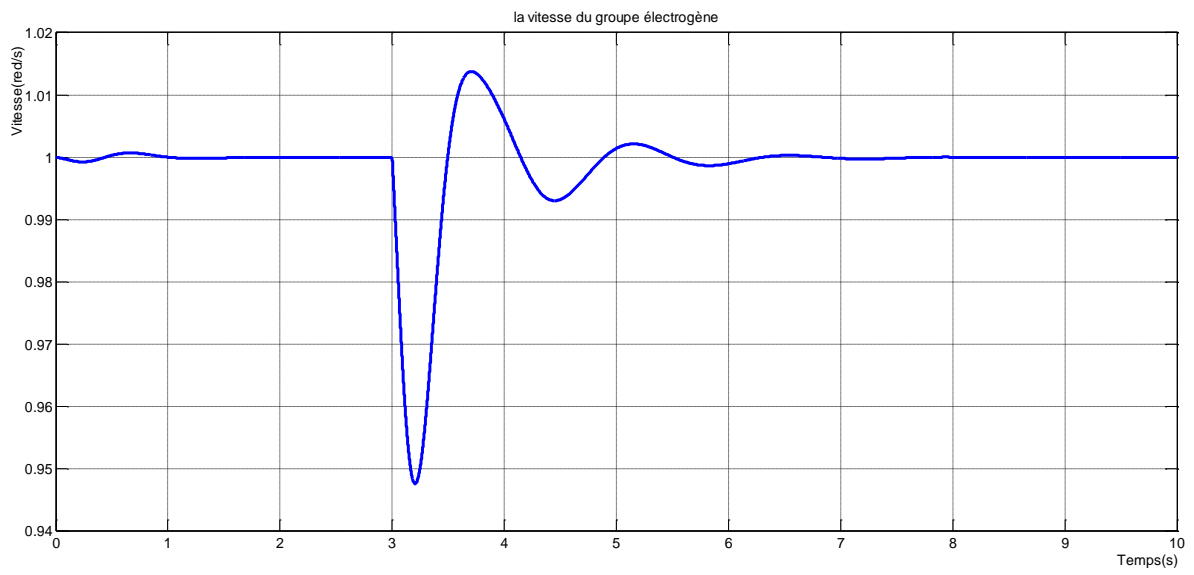
Figure III.9 :La tension de champ.



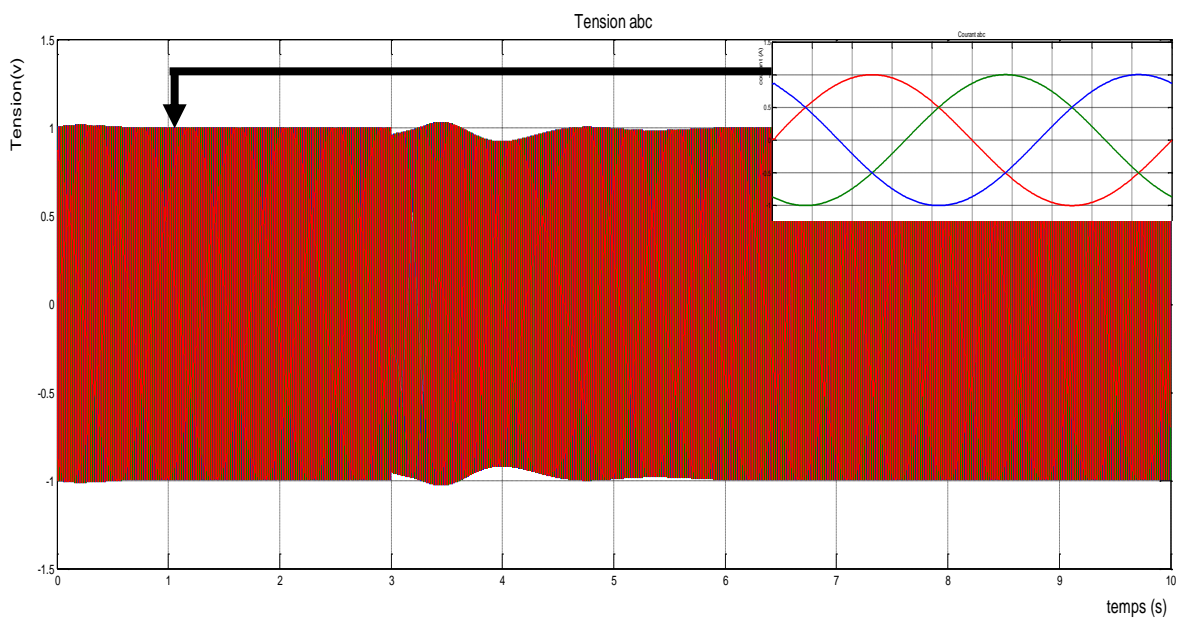
**Figure III.10 :** *Tension aux bornes de la machine synchrone.*



**Figure III.11 :** *la puissance de sortie mécanique du moteur diesel.*



**Figure III. 12 :** *La vitesse du groupe électrogène.*



**Figure III.13 :** *tension abc de la machine synchrone*

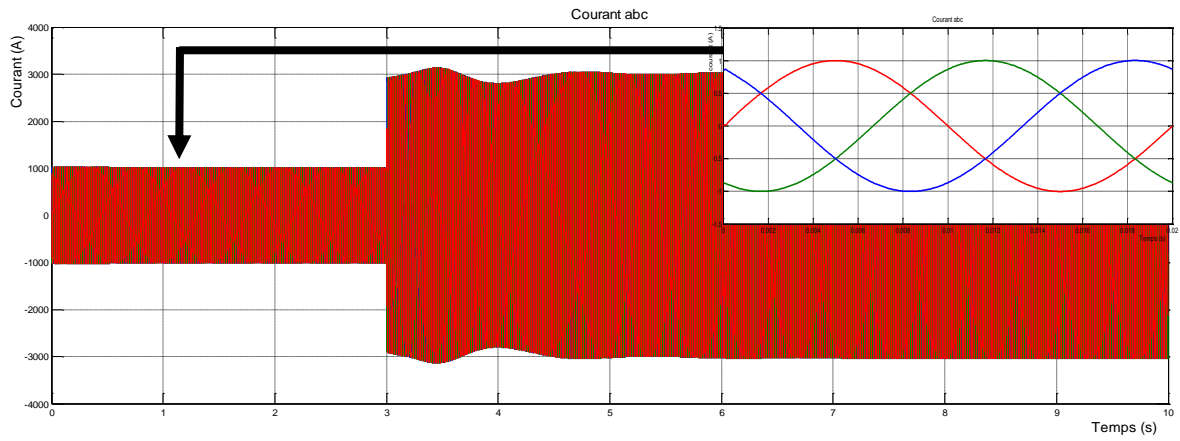


Figure III.14 :courant abc de la machine synchrone

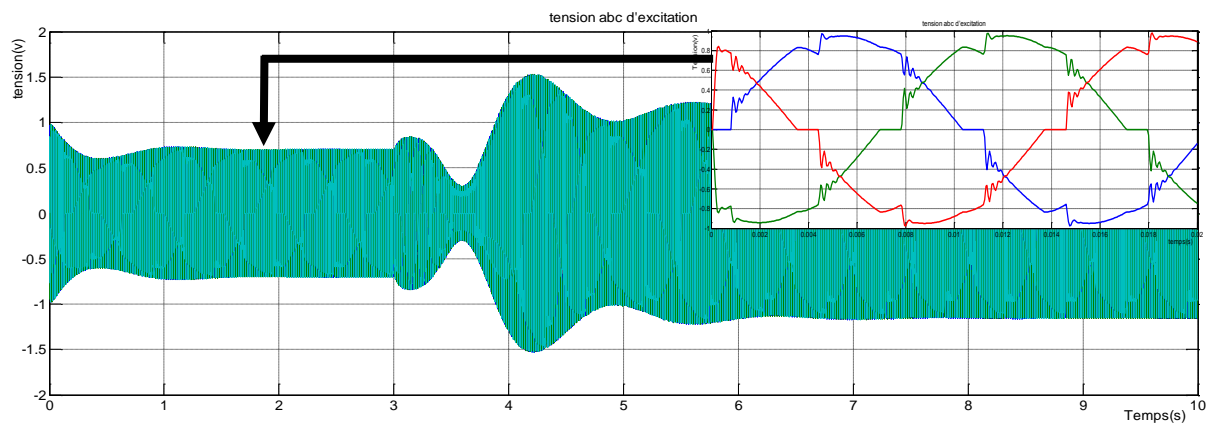


Figure III.15 :tension abc d'excitation

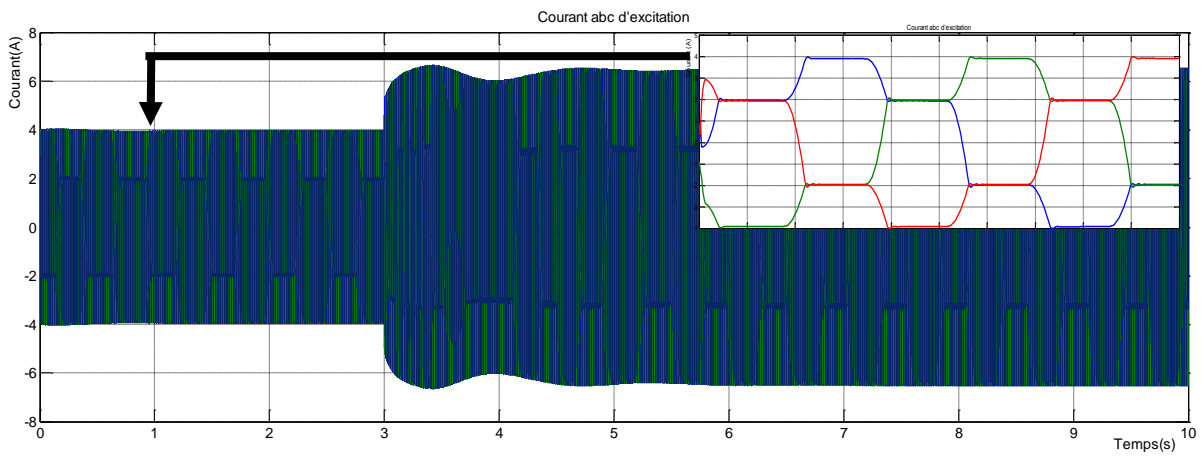


Figure III.16 :courant abc d'excitation

### III.6. Discussion

De 0 à 3 secondes, la machine synchrone fournit  $500 \text{ kW}$  (25% de la puissance nominale). À  $t = 3$  secondes,  $1000 \text{ kW}$  supplémentaires sont activés en fermant le disjoncteur de la charge électrique. Afin de maintenir la tension à  $1 \text{ pu}$ , le courant d'excitation augmente de  $112 \text{ A}$  à  $185 \text{ A}$  (Figure III.8). La tension de champ (Figure III.9) contient une ondulation de  $300 \text{ Hz}$ , mais cette ondulation n'apparaît pas dans le courant de champ en raison de la grande inductance de champ. La Figure III.10 montre qu'après tension, la tension aux bornes de la machine synchrone reprend sa valeur nominale après 3 secondes transitoires. Les Figures 11 et 12 indiquent la puissance de sortie mécanique du moteur diesel et la vitesse du groupe électrogène. La régulation de vitesse maintient une vitesse de  $1 \text{ pu}$  et une fréquence nominale (tension de sortie de  $50 \text{ Hz}$ ).

### III.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de savoir plus sur l'importance, le rôle et le fonctionnement d'un système d'excitation d'un alternateur synchrone. Pour ce faire nous avons simulés les résultats désirés tel que:

- 1- le courant d'excitation.
- 2- La tension de champ.
- 3- tension aux bornes de la machine synchrone.
- 4- la puissance de sortie mécanique du moteur diesel.
- 5- la vitesse du groupe électrogène.

D'après les analyses des résultats de simulation obtenu on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement deux:

- Le premier c'est d'assurer une alimentation permanente vert la charge.
- Le second est de réalisé un système d'excitation adaptatif au variation de la charge électrique.

## Conclusion générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Dans le domaine de la vitesse variable, la machine synchrone assure actuellement une part très importante et toujours croissante du marché grâce à sa simplicité, sa robustesse et son faible coût de fabrication. Malgré tous ces avantages, sa commande reste complexes comparativement à celle de la machine à courant continu.

Il existe des nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des alternateurs synchrones. Mais le problème major ici c'est la variation fréquente de la charge électrique, elle est variable tout le temps.

Les travaux présentés dans ce mémoire, ont été consacré à l'étude, la modélisation et la simulation numérique d'un alternateur synchrone entraînée par un moteur diesel et alimente une charge électrique variable, on note que la régulation de vitesse est en boucle fermée.

Comme nous avons dit au troisième chapitre et d'après les analyses des résultats de simulation obtenue on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement deux:

- Le premier c'est d'assuré une alimentation permanente vert les charges électriques.
- Le second est de réalisé un système d'excitation adaptatif au variation de la charge électrique.

Ainsi nous allons développer les dimensionnement de notre système puis nous allons simuler le fonctionnement du système régler ce qui nous permettra d'évaluer ses performances.

Le travail sur les systèmes d'excitations en général, implique encore plus de recherche dans le domaine de la production d'énergie électrique, vue son immense importance dans l'ensemble des composantes des centrales électriques. Notre travail en particulier, présente une sérieuse perspective et un grand acquis si en vue de la conception expérimentale de cet élément.

## **Bibliographie**

- [1] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » thème magister en électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, Faculté des sciences de l'ingénieur Département d'électromécanique 2010.
- [2] Mr. SAHLI Arab Mr. OURARI Loucif «Réglage Et Contrôle De La Vitesse De La Machine Synchrone A Aimant Permanent » Mémoire Master en électrotechnique, Université de Bejaia 2015 Faculté de génie électrique.
- [3] CLAUDE CHEVASSU « MACHINES SYNCHRONES» Cours Ecole Nationale Supérieure Maritime.
- [4] Théodore wildi, Gilbert Sybille «Electrotechnique quatrième édition », Livre, Edition de Boeck, Canada, 2005.
- [5] Chibani Aziz, «Etude pour la conception d'une machine synchrone à rotor externe», Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, Algérie, 2011.
- [6] Elkali Laid, «Etude et modélisation d'un turbo-alternateur», Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2014.
- [7] Bernard. MULTON, « Les Machines Synchrones Autopilotées », ENS de Cachan, 2004.
- [8] Kaidi Ismahane, «Contribution à la mise en place d'un contrôle sante intégré sur un turboalternateur», Mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, 2009.
- [9] Benchouia mohamed Toufik, « commande de la machine à courants alternatif par différents techniques de contrôle avancées » thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie.
- [10] Moustafa Al ait, «Modélisation des machines synchrones à pôles saillants pour les études de la stabilité électromécanique», Mémoire d'ingénieur, Université Libanaise, Liban, 2013.
- [11] Messaadi Mouna « commande backstepping appliquée à la machine synchrone à aimant permanent »pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique. Université Hadj Lakhdar-Batna ,2012.
- [12] Hamichi Azedine Benkerrou Farid « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent » Mémoire Master en électrotechnique, Université de Bejaia Faculté de génie électrique 2015.

- [13] Dali Youcef Abdelaziz Et Djemaoun Yassine « Réalisation de la commande d'un moteur synchrone» Mémoire Master en électrotechnique Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2015.
- [14] P.Kundur. "Power System Stability and Control" , New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [15] Hajagos, 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.
- [16] Dr.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.
- [17] M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, « A Generator Transfer Function Regulator for Improved Excitation Control », IEEE Trans on. Power Systems, Vol.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.
- [19] P.M.Anderson, A.A Fouad. « Power System Control and Stability », IEEE Press, 2003.
- [20] Prepared by the IEEE Working Group on Computer Modelling of Excitation Systems. « Excitation system models for power system stability studies », IEEE committee report, February 1981.
- [21] Q.Zhao.J.Jiang, « Robust Controller Design for Generator Excitation Systems », IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.10, N°2, June 1995, pp.201-207.
- [22] Technical Report IEC International Electrotechnical Commission, ref.34-16-2, «Excitation systems for synchronous machines ». First edition 1991-02.
- [23] N.Srikanth (M.Tech), Atejasri-M.Tech Dept of IEEE, GIET, Rajahmundry, A.P-India, « Enhancing power system stability by using thyristor controlled series compensator », Vol.2, Issue 5, September-October 2012, pp 1817-18-24.
- [24] Ould mouhamed ibrahim, « Etude d'un turbo-alternateur, modélisation et simulation de l'alternateur », Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2010.
- [25] Marcel NOUGARET, Principes généraux de la correction. Edition Technique de l'ingénieur 2012.
- [26] Alina BESANCON-VODA & Sylviane GENTIL, Régulateur PID analogiques et numériques. Edition Technique d'ingénieur 2012.

- [27] Jean-Marie Flaus, La régulation industrielle; régulateur PID, Prédictifs et flous. Edition HERMES, Paris 1994.
- [28] T .Douadi, « Etude de performances de la CV-OFR et la DTC ». Mémoire d'ingénieur d'Electrotechnique, Université de Batna, 2004.
- [29] Kadri Ahmed Yacine «Régulation Automatique »Université Kasdi Merbah Ouargla Algérie, 2014.
- [30] Ben Kherif Oussama « Etude Comparative En Simulation Entre Un Régulateur PID Classique Et Un Régulateur PID Intelligent » Mémoire De Master, Universite M'sila Département D'électronique 2016.
- [31] Alina BESANCON-VODA & Sylviane GENTIL, Régulateur PID analogiques et numériques. Edition Technique d'ingénieur 2012.
- [32] Jean-Marie Flaus, La régulation industrielle; régulateur PID, Prédictifs et flous. Edition HERMES, Paris 1994.
- [33] C. le Lann, Le PID utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques. Projet de fin d'étude 2007.
- [34] Anant Oonsivilai and Padej Pao-La- Or. « Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System ». Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol. 3, june 2008.
- [35] Cao Yuan, Ma Jin, « Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System », Critical infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference. 20-22 Sept. 2010.
- [36] Wei, and Zheng Xu, Member, IEEE, « Excitation System Parameters Setting for Power System Planning ». Power Engineering Society Summer Meeting IEEE 2002.
- [37] Working Group on Prime and Energy Supply « Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies ». 1992 IEEE tram. Power System.
- [38] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies « Hydraulic Turbine and turbine control models for system dynamic studies », Transactions on Power Systems, vo1.7, no.1, February 1992.

[39] Zahi SABEH, « Diagnostic A Base De Modèle : Application `A Un Moteur Diesel Suralimenté A Injection Directe » Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Lorraine- Centre De Recherche En Automatique De Nancy, 2006.

[40] Omar FEDDAOUI « Contribution A l'Etude Des Systèmes Hybrides De Génération : Application Aux Energies Renouvelables » Mémoire De Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia De Souk-Ahras, 2013-2014.

[41] Tommy Andy Theubou Tameghe « Modélisation Et Simulation D'un Système De Jumelage Éolien-Diesel Alimentant Une Charge Locale » Mémoire De La Maîtrise En Ingénierie, Université Du Québec, 2012.

## Résumé

**Titre du mémoire :** Régulation de la vitesse d'un alternateur synchrone.

**Master :** Electromécanique.

**Auteur :** Abdulaziz Imad Gamil , Makaoui Taher , Mahmoudi Houcine.

**Mots clés :** *Alternateur synchrone, Moteur diesel, Régulation, Modélisation, MATLAB /SIMULINK.*

### Résumé :

le travail effectué porte sur une étude d'un système d'alimentation de énergie électrique pour une charges électrique variable par un alternateur synchrone, cet dernier est entraîné par un moteur diesel, avec une régulation de vitesse en boucle fermé. on a atteint les objectifs fixés c'est-à-dire la réalisation d'un système de production de l'énergie électrique peut adapté au variation de la charge. Nous avons validé les résultats de simulation dans l'environnement *MATLAB/SIMULINK*, et tous les résultats sont effectué et interprété.

---

**Report title:** REGULATION OF THE SPEED OF A SYNCHRONOUS ALTERNATOR.

**Keywords:** Synchronous Alternator, Diesel Engine, Regulation, Modeling, *MATLAB / SIMULINK.*

### Abstract:

the work carried out concerns a study of an electrical power supply system for a variable electrical load by a synchronous alternator, the latter is driven by a diesel engine, with closed-loop speed regulation. the objectives have been reached, that is to say the realization of a system of production of electrical energy can be adapted to the variation of the load. We validated the simulation results in the *MATLAB / SIMULINK* environment, and all results are performed and interpreted.

---

**عنوان المذكرة:** تعديل (تنظيم) سرعة المولد المتزامن.

**الكلمات المفتاحية:** المولد المتزامن ، محرك الديزل ، التعديل ، النمذجة ، *MATLAB / SIMULINK.*

### الملخص:

يتعلق العمل المنجز بدراسة لنظام إمداد الطاقة الكهربائية لحمل كهربائي متغير بواسطة مولد متزامن ، ويتم تشغيل هذا الأخير بواسطة محرك ديزل ، مع تنظيم السرعة بحلقة مغلقة ، ولقد تم الوصول إلى الأهداف المسطرة ، حيث تم تحقيق نظام إنتاج الطاقة الكهربائية هذا النظام يمكن تكيفه مع تغير الحمل ، تم التحقق من نتائج المحاكاة في بيئة *MATLAB / SIMULINK*، وتم تنفيذ جميع النتائج وتفسيرها.