

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة
Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie



Mémoire de fin d'étude
*En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** en Automatique*
Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème :

Régulation de tension d'un alternateur
de puissance

Présenté par :

- Mr. TAIEB BENABBAS Mohamed
- Mlle. MESSADIA Habiba

Devant le jury composé de :

- Mr. BOUKLI OMAR Président
- Mr. KERRACI Abdelkader Encadreur
- Mr. BENTCHIKOU Brahim Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018

Dédicaces

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents ;

A toute personne qui m'a aidé à poursuivre mes études ;

A mes très chers proches à mon cœur que je les aime beaucoup ;

A mes frères Abbas, Abdeslam, Soufian ;

A mes Amies les plus Proches de mon cœur ;

A celle qui m'a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, à mon binôme Habiba ;

A Toute mes Enseignants d'automatique ;

A Toute la promotion automatique et informatique industrielle 2018 ;

A mon encadreur Mr. KERRACI

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers.

TAIEB BENABBAS Mohamed

Dédicaces

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère et mima qui a été à mes côtés et m'ont soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A toute personne qui ma aider à poursuivre mes études ;

A mes très chers proches à mon cœur que je les aime beaucoup ;

A mes sœurs Rima, Mira, Khadidja, Imane et Boutheïna ;

A mes frères Mohamed Wafik, Ramzi, Younes et Rayane ;

A mon fiancé nouredin ;

A toute mes oncles, mes tantes et mes cousins ;

A mes Amies les plus Proches de mon cœur ;

A celui qui m'a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, mon binôme Mohamed ;

A Tout mes Enseignants d'automatique ;

A Toute la promotion automatique et informatique industriel 2018 ;

A mon encadreur Mr. KERACI

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers ;

MESSADIA Habiba

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la force Pour réaliser ce mémoire.

Egalement, nous exprimons nos plus profonds remerciements à :

✚ *Nos parents pour leur soutien moral et matériel,*

✚ *Les membres de jury de soutenance Mr. BOUKLI Omar et Mr.*

BENTCHIKOU Brahim d'avoir accepté d'examiner et juger notre travail.

✚ *Notre encadreur, Mr. KERRACI Abdelkader*

✚ *L'équipe d'industrie de sewidi câble et surtout M^{er} LAZALI Rabah.*

✚ *Particulièrement à Mr IQDIMAT Ahmed, Mm BENHADJ*

MHAMED Imen, Mr REBHI Abdlkader et Mr SADOUKI Ridha.

Résumé

L'électricité est un élément essentiel dans la vie humaine, elle est indispensable dans tous les domaines, que ce soit domestique, industriel ou agricole, et afin de produire cette énergie nous utilisons des générateurs appelés alternateurs, cette énergie sera transportée et livrer au consommateur dans la valeur qu'elle a besoin (tension, fréquence et puissance), mais ce n'est pas le cas toujours à cause de fluctuation de la consommation journalière de l'électricité ainsi les pertes dans les lignes. Ce qui oblige les fournisseurs d'électricité à ajuster l'énergie en réglant la fréquence et la tension et de fournir la puissance demandée par la clientèle.

Notre travail a pour objectif de faire la régulation de tension alternateur de puissance en utilisant une commande classique qui est la commande proportionnelle intégrale dérivée (PID). Nous introduirons tout d'abord les notions de la technologie et le fonctionnement des machines synchrones et en particulier l'alternateur. Après la modélisation de l'alternateur sera présenté d'une façon explicite. Ainsi les différentes étapes pour faire la régulation de tension de l'alternateur sera détaillé et validé par simulation sous l'environnement Simulin/Matlab.

Mots-clés : Générateur synchrone, système d'excitation, modélisation et linéarisation, régulateur PID de tension, Stabilité.

ملخص

الكهرباء عنصر أساسي في حياة الإنسان، وضروري في كل المجالات، سواء المنزلية والصناعية أو الزراعية، والطاقة التي نستخدمها تنتجها مولدات، تنقل هذه الطاقة وتصل إلى المستهلك بالقيمة التي يحتاجها (الجهد والتردد والطاقة)، ولكن هذا ليس هو الحال دائماً بسبب التغيرات في الاستهلاك اليومي من الكهرباء والضياعات في الخطوط. مما يجبر منتجي الكهرباء على ضبط الطاقة عن طريق ضبط التردد والجهد الكهربائي وتوفير الطاقة المطلوبة من قبل الزبائن.

الهدف من بحثنا هو القيام بضبط الجهد الكهربائي لمولدات الطاقة باستخدام التحكم التقليدي وهو (PID). سنقدم أولاً مفاهيم عن تكنولوجية وتشغيل الآلات المترامنة وخاصة مولد التيار المتردد. بعد ذلك سيتم تقديم نموذج المولد وعرضه بطريقة واضحة. بعد ذلك، فإن الخطوات المختلفة لضبط الجهد للمولد ستفصل ويتم التحقق منها عن طريق المحاكاة

باستعمال البرنامج Simulink / Matlab

الكلمات المفتاحية: مولد مترامن، نظام التحريض، النمذجة الخطية، منظم PID الجهد، الاستقرار.

Abstract

Electricity is an essential element in human life, it is essential in all areas, in domestic, industrial or agricultural domain, and in order to produce this energy we use generators called alternators, this energy will be transported and delivered to the consumer whose the value needs (voltage, frequency and power), but this is not always the case because of fluctuation in the daily consumption of electricity and losses in the lines. This forces electricity providers to adjust energy by adjusting frequency and voltage and to provide the power required by customers.

Our object is to make power alternator voltage regulation using a conventional control which is the proportional–integral–derivative controller (PID). We will first introduce the concepts of technology and the operation of synchronous machines and in particular the alternator. And then the modeling of the alternator is presented in an explicit way. Thus, the different steps for regulating the voltage of the alternator will be detailed and validated by simulation under the Simulink / MATLAB environment.

Keywords: Synchronous generator, excitation system, modeling and linearization, PID voltage regulator, Stability.

Liste des Notations et abréviations

<i>AC</i> :	Courant alternatif
<i>AVR</i> :	Automatic voltage regulator (régulateur automatique de tension)
<i>Cos(φ)</i> :	Le facteur de puissance
<i>DC</i> :	Courant continu
<i>f</i> :	Fréquence en Hz
<i>f.e.m</i> :	La force électromotrice
<i>FT_a</i> :	Fonction de transfert d'alternateur
<i>FT_e</i> :	Fonction de transfert d'excitation
<i>E</i> :	F.e.m. Transitoire de la machine synchrone.
<i>GP</i> :	Génératrice principale
<i>GS</i> :	Génératrice synchrone
<i>HT</i> :	Haute tension
<i>I</i> :	Le courant de charge
<i>I_A</i> :	Le courant d'alternateur
<i>I_{ex}</i> :	Le courant d'excitation
<i>i_e</i> :	Le courant de champ
<i>I_R</i> :	Le courant de roue polaire
<i>I_s</i> :	Courant de la machine
<i>K_b</i> :	Facteur de bobinage
<i>K_d</i> :	Le temps dérivatif
<i>K_i</i> :	Le temps intégral
<i>K_p</i> :	Le gain proportionnel
<i>L</i> :	La longueur du conducteur
<i>L_D</i> :	Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct
<i>L_Q</i> :	Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature
<i>L_d</i> :	Inductance synchrone longitudinale
<i>L_f</i> :	Inductance propre de l'inducteur
<i>L_r</i> :	Inductance rotorique
<i>L_q</i> :	Inductance synchrone transversale
<i>L₀</i> :	Inductance homopolaire
<i>M_{aD}</i> :	Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe direct et l'induit
<i>M_{aQ}</i> :	Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe en quadrature et l'induit
<i>M_{af}</i> :	Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit
<i>M_{fD}</i> :	Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct
<i>MT</i> :	Moyen tension
<i>N</i> :	La vitesse (tour/min)
<i>N_c</i> :	Nombre des conducteurs par phase
<i>P</i> :	La puissance active (W)
<i>PID</i> :	Proportionnel intégral et dérivé
<i>P_{JS}</i> :	Pertes joule induit (stator)

P_m :	Puissance mécanique
P_u :	La puissance utile
Q :	La puissance réactive (VAR)
THT :	Très haut tension
T_m :	Le couple mécanique
U_A :	La tension d'alternateur
U_R :	Tension rotorique de l'alternateur
V :	La tension
V_{abc} :	Les tensions des phases statoriques.
V_{eff} :	Tension efficace
V_S :	Tension aux bornes de la machine.
R :	La résistance d'un conducteur
R_a :	Résistance d'une phase statorique
R_{fdQ} :	Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe Q
R_r :	Resistance rotorique
S :	La puissance apparent (VA)
S_c :	la section du conducteur
X_d :	Réactance transitoire de la machine.
δ :	L'angle de déphasage interne
ρ :	Résistivité
φ :	Flux utile par pole
Φ_{abc} :	Les flux totaux à travers les bobines statorique
Ω :	La vitesse (rad/s)

Listes des tableaux

Tableau III.1	Résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID...	54
Tableau III.2	Tableau d'influence.....	54
Tableau III.3	Caractéristiques de l'alternateur.....	56
Tableau III.4	Paramètres utilisés pour le système de régulation automatique.....	63
Tableau III.5	Paramètres de régulateur PID avec plusieurs fonctions objectives	65

Liste des figures

Fig.I.1 Phénomènes d'induction.....	4
Fig.I.2 Phénomènes d'induction.....	5
Fig.I.3 Induction avec un aimant électrique.....	5
Fig.I.4 Induction avec un aimant permanent.....	6
Fig.I.5 Loi de faraday.....	6
Fig.I.6 La règle de la main droite.....	7
Fig.I.7 Conversion énergétique réalisée par l'alternateur synchrone	8
Fig.I.8 Symboles électriques d'un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné.....	8
Fig.I.9 Structure d'un stator.....	9
Fig.I.10 Action du ressort sur les balais.....	9
Fig.I.11 structure du rotor d'alternateur.....	10
Fig.I.12 Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.....	11
Fig.I.13 Rotor d'une machine synchrone à pôles lisses.....	12
Fig.I.14 Principe de la production de courant dans l'alternateur.....	12
Fig.I.15 Schéma d'un alternateur synchrone.....	14
Fig.I.16 Système d'excitation de type DC.....	18
Fig.I.17 Excitation de type AC avec redresseur non commandé.....	19
Fig.I.18 Excitation de type AC avec redresseur commandé.....	19
Fig.I.19 : L'excitation AC de type Brushless.....	20
Figure I.20 Système d'excitation statique.....	20
Fig.I.21 Principe d'excitation par auto-alimentation.....	21
Fig.I.22 Excitation shunt.....	21
Fig.I.23 Excitation compound (obsolète).....	22
Fig.I.24 Excitation shunt avec régulation électronique.....	23
Fig.I.25 Emploi d'une dynamo excitatrice.....	23
Fig.I.26 Emploi d'un alternateur d'excitation (système « bushes »)	24
Figure I.27 schéma d'une centrale hydroélectrique.....	25
Figure I.28 Schéma d'une centrale thermique à flamme.....	26
Fig. I.29 schéma d'une centrale éolienne.....	27
Fig.II.1 Représentation d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents....	29
Fig. II.2 Représentation simplifiée d'une machine synchrone.....	30
Fig. II.3 Machine synchrone triphasé avec amortisseurs.....	32

Fig. II.4 Machine synchrone triphasé, amortisseurs assimilés à deux enroulements en court-circuit, à 90° l'un de l'autre.....	34
Fig. II.5 Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone....	36
Fig. II.6 Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone (a) axe direct, (b) axe quadrature.....	38
Fig. II.7 Schéma équivalent d'un alternateur triphasé.....	39
Fig. II.8 Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur	40
Fig. II.9 Diagramme des tensions.....	40
Fig. II.10 Diagramme de charge résistive.....	41
Fig. II.11 Diagramme de charge inductive.....	42
Fig. II.12 Diagramme de charge capacitive.....	42
Fig. II.13 Diagramme PQ.....	42
Fig. II.14 Courbe présente les pertes en fonction de puissance apparente.....	46
Fig. II.15 Diagramme qui présente toutes les pertes possibles	47
Fig. II.16 Schéma équivalent d'alternateur	47
Fig. II.17 courbe qui présent la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté.....	48
Fig. II.18 Schéma équivalent d'alternateur	49
Fig. II.19 Courbe qui présent F.e.m rémanente en fonction de I_{ex}	49
Fig.III.1 Schéma synoptique d'un régulateur PID.....	53
Fig III.2 Schéma Bloc du système d'excitation	56
Fig III.3 Schéma équivalent de partie inducteur (rotor).....	60
Fig III.4 Schéma équivalent de l'induit (stator).....	61
Fig.III.5 Diagramme de BEHN ESCHENBURG.....	61
Fig. III.6 Schéma bloc de système d'alternateur.....	63
Fig.III.7 La reponse de systhme son régulation.....	64
Fig.III.8 Diagramme schématique du schéma régulateur de tension de l'alternateur...	64
Fig.III.9 Schéma bloc de régulation de tension.....	65
Fig.III.10 Réponse indicielle du système avec changement de K_p , K_i et K_d	65
Fig.III.11 Réponse indicielle du système pour le 1 ^{er} cas.....	66
Fig.III.12 Erreur de système pour le 1 ^{er} cas.....	67
Fig.III.13 Réponse de système pour le 2 ^{eme} cas	67
Fig.III.14 Erreur de système pour le 2 ^{eme} cas.....	68

Fig.III.15 Réponse de système pour le 3 ^{ème} cas.....	68
Fig.III.16 Erreur de système pour le 3 ^{ème} cas.....	69
Fig.III.17 Réponse de système pour le 4 ^{ème} cas.....	69
Fig.III.20 Erreur de système pour la 4 ^{ème} cas.....	70

Table des matières

Introduction générale	2
Chapitre. I L'ALTERNATEUR, TECHNOLOGIE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	
I.1	Phénomènes d'induction..... 4
I.2	Le champ magnétique..... 4
I.3	Induction magnétique..... 5
I.3.1	Aimant électrique..... 5
I.3.2	Aimant permanent..... 6
I.4	Loi de Faraday 6
I.5	Loi de Lenz..... 7
I.6	La règle de la main droite..... 7
I.7	L'alternateur..... 7
I.7.1	Définition..... 7
I.7.2	Symbole électrique..... 8
I.7.3	Les constitutions d'un alternateur..... 8
A)	Le stator (l'induit) 8
B)	Bagues collectrices et les balais 9
C)	Le rotor (l'inducteur) 10
D)	Ventilateur..... 10
I.7.4	Types d'alternateur..... 11
1.	Alternateur à rotor à pôles saillants..... 11
2.	Alternateur à rotor à pôles lisses..... 11
I.7.5	Principe de fonctionnement 12
A.	Création de forces électromotrices triphasées 13
B.	Fonctionnement à vide 13
C.	Fonctionnement en charge..... 14
I.7.6	Couplage des Alternateurs..... 15
I.7.7	Excitations des alternateurs..... 17
1.	Système d'excitation à courant continu (DC) 18
2.	Système d'excitation à courant alternatif (AC) 18
3.	Système d'excitation statique 20
4.	Auto-alimentation..... 21
5.	Excitation shunt..... 21
6.	Excitation compound (obsolète) 22
7.	Excitation shunt avec régulation électronique..... 22
8.	Emploi d'une dynamo excitatrice..... 23
9.	Emploi d'un alternateur d'excitation (système « bushes »)..... 23
I.8	Les différents types des centrales électriques 24
I.8.1	Centrale hydraulique 25
I.8.2	Centrale thermique..... 26
I.8.3	Centrale éolienne..... 27

I.9	Conclusion	31
-----	------------------	----

Chapitre II. MODELISATION DE L'ALTERNATEUR

II.1	Structure générale de la machine synchrone.....	29
II.2	Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné	30
II.2.1	Modèle linéaire	30
II.2.2	Modèle de Park	31
II.2.3	Hypothèses simplificatrices	32
II.2.4	Equations électriques et magnétiques	33
II.2.5	Transformation de Park	35
II.2.6	Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor	36
II.2.7	Equations des flux et courants	37
II.2.8	Schéma équivalent de la machine synchrone	38
II.3	Principe de la production de forces électromotrices triphasées équilibrées	39
II.3.1	Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur	40
II.3.2	Diagramme des tensions et autre expression de la f.e.m	40
II.3.3	Diagrammes de fonctionnement en charge	41
II.4	Bilan des puissances de la machine synchrone	43
II.4.1	Puissance utile.....	43
II.4.2	Rendement de l'alternateur.....	43
	1. Pertes de l'alternateur différentes	43
	2. Pertes par effet joule	44
	3. Pertes joule inducteur.....	44
	4. Pertes joule induit.....	45
	5. Pertes par courants de Foucault.....	45
	6. Pertes par hystérésis.....	45
	7. Pertes par ventilation de l'alternateur.....	45
	8. Pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses Paliers.....	46
	9. Pertes supplémentaires.....	46
II.4.3	Représentation graphique des différentes pertes.....	46
II.4.4	Formules du rendement	47
II.5	Caractéristiques.....	47
II.5.1	Caractéristiques en charge	47
	1. Caractéristique externe	48
II.5.2	Caractéristique à vide.....	49
II.6	Conclusion.....	50

Chapitre III. REGULATION DE TENSION ALTERNATEUR

III.1	Régulateur PID.....	52
III.1.1	Loi de commande du régulateur PID	52
III.1.2	Fonction de transfert du régulateur PID	53
III.1.3	Les actions PID.....	53
III.2	Régulation de tension d'alternateur.....	54
III.2.1	Pourquoi règle-t-on la tension à certaines valeurs de référence ?.....	55

III.2.2	Les causes des variations possibles de tension	55
III.2.3	Moyens de réglages de la tension	55
III.2.4	Principe de réglage	57
	1) Régulation adaptée	57
	2) Mesure des grandeurs rapportées aux régulateurs	59
III.3	Détails du modèle de système.....	61
III.3.1	Fonction de transfert de l'amplificateur	62
III.3.2	Fonction de transfert de l'excitation	62
III.3.3	Fonction de transfert du Générateur	62
III.3.3	Fonction de transfert du capteur	62
III.4	Etude de stabilité de système	63
III.4.1	La fonction de transfert de système	63
III.5	Réponse indicielle du système sans régulation	64
III.6	Etude de système avec régulation	64
III.6.1	Régulation de tension à vide.....	65
III.6.2	Régulation de tension en charge.....	66
	1. 1er cas.....	66
	2. 2eme cas.....	67
	3. 3eme cas.....	68
	4. 4eme cas.....	69
III.7	Résultats et discussion.....	70
III.8	Conclusion.....	70
	Conclusion générale.....	73

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La tension électrique. Elle est d'abord affectée par des variations lentes et générales liées aux cycles d'évolution saisonnière, hebdomadaire et quotidienne de la consommation (sans action préventive de la part des gestionnaires, la tension serait plutôt basse aux heures de pointe et haute aux heures creuses) ; elle subit aussi des variations rapides liées à de multiples aléas : fluctuations aléatoires des charges, changements de topologie du réseau, déclenchements d'ouvrages de transport ou de groupes de production.

Il est donc nécessaire, pour que la tension soit maintenue en tout point du réseau dans la plage souhaitée. Dans les centrales, ce réglage est obtenu automatiquement à l'aide de régulateur de tension.

Le régulateur de tension de l'alternateur, à pour rôle de maintenir la tension alternateur alimentant un réseau séparé à une valeur constante quels que soient le facteur de puissance et l'intensité du courant débité par le stator, ce qui va assurer la sûreté, la qualité et l'optimisation du système électrique. Tout en permettant aux utilisateurs du réseau de faire fonctionner leurs matériels dans des conditions optimales, il assure aux gestionnaires du réseau une exploitation des réseaux à moindre coût et dans des conditions de sûreté satisfaisante.

Le but de notre travail est d'étudier la régulation de tension de l'alternateur de puissance modélisé par des fonctions de transfert (système linéaire), et pour bien traiter le problème, nous avons opter pour la structure suivante de notre mémoire.

Dans le chapitre 1, nous allons présenter les concepts théoriques et pratiques liées aux fonctionnements et l'utilisation des alternateurs triphasés. L'objectif de cette partie est d'illustrer les parties essentielles du turbo-alternateur, son installation et conception dans différentes centrales électriques.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park. Nous avons modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation du système à régler ainsi les différentes étapes à suivre pour réaliser notre objectif qui est la régulation de tension alternateur par un correcteur PID classique, ou nous allons discuter les résultats obtenus. Ce mémoire va être clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I

L'alternateur, technologie et principe de fonctionnement

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de la quasi-totalité de l'énergie électrique consommée dans le monde. 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.

L'alternateur est une machine synchrone qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, par lequel les centrales de production de l'électricité sont équipées (turbo-alternateur).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les concepts théoriques et pratiques liées aux fonctionnements et l'utilisation des alternateurs triphasés. L'objectif de cette partie est d'illustrer les parties essentielles du turbo-alternateur, son installation et conception dans différentes centrales électriques

I.1 Phénomènes d'induction

Action mutuelle de deux aimants : [1] [14]

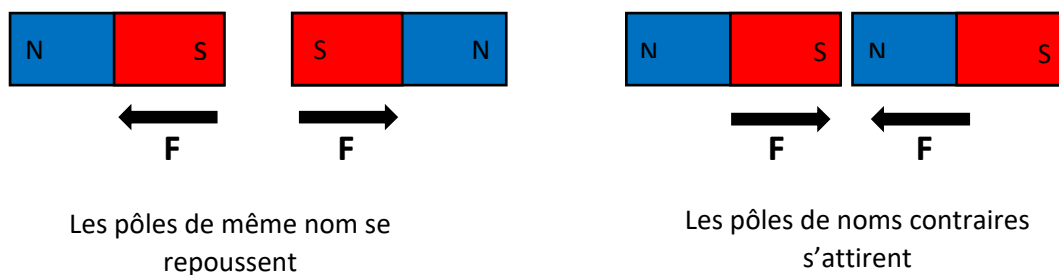


Fig.I.1 phénomènes d'induction

I.2 Le champ magnétique

L'action d'un aimant qui se manifeste dans une région de l'espace est appelée champ magnétique.

Le champ magnétique peut être matérialisé par des LIGNES DE FORCE qui indiquent en tout point la direction de son effet.

Le sens des lignes de force a été conventionnellement choisi, du pôle nord vers le pôle sud à l'extérieur de l'aimant. [1]

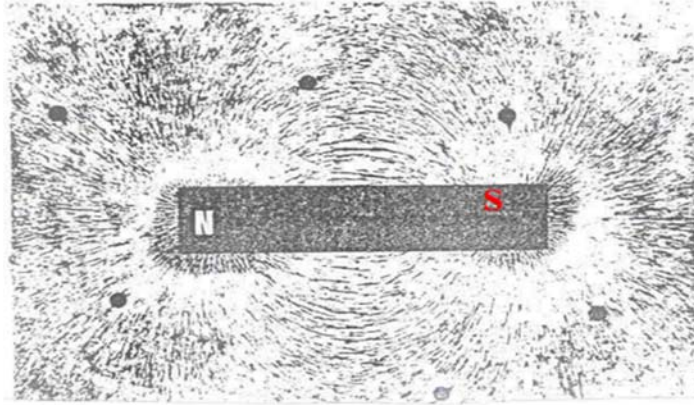


Fig.I.2 Phénomènes d'induction

I.3 Induction magnétique

L'induction magnétique B est une grandeur définissant la valeur du champ magnétique en un point donné. Elle s'exprime en TESLA (T).

C'est au centre de la bobine que cette induction est la plus importante. [1] [14]

I.3.1 Aimant électrique :

Générateur avec flux donné de courant continu injecté dans ces enroulements de champs.

Pendant le déplacement de l'aimant, un courant prend naissance dans la bobine
Ce courant est appelé : COURANT INDUIT [1] [14]

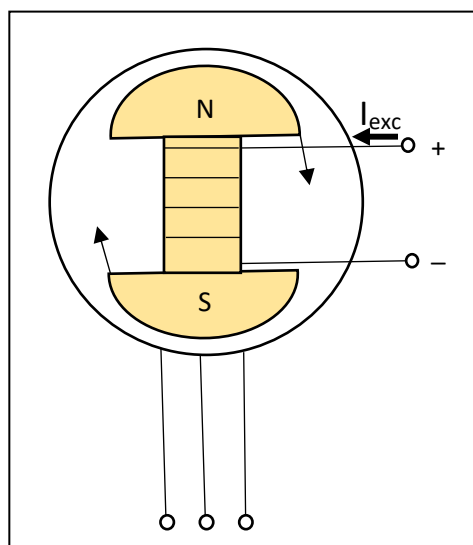


Fig.I.3 induction avec un aimant électrique

I.3.2 Aimant permanent :

Générateur avec flux donné d'aimant permanent tournant. [14]

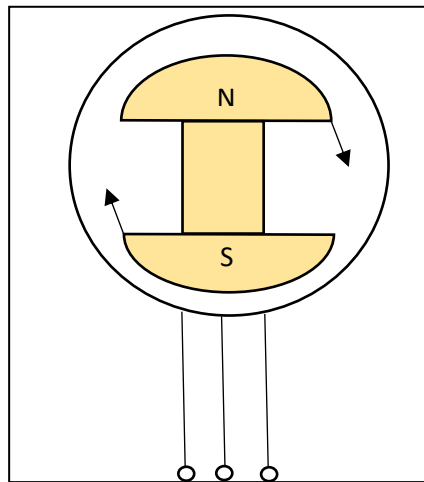


Fig.I.4 induction avec un aimant permanent

I.4 Loi de Faraday :

La loi de Faraday énonce que la force électromotrice induite dans un circuit fermée baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Avec N désigné le nombre de spires et $\Phi(t)$ le flux qui traverse les N spires. Le signe négatif déterminé le sens du courant induit dans le circuit. Il est régi par la loi de Lenz qui énoncé que le sens du courant induit est tel quel s'oppose par ses effets magnétiques à la cause qui a produit le courant. [2] [14]

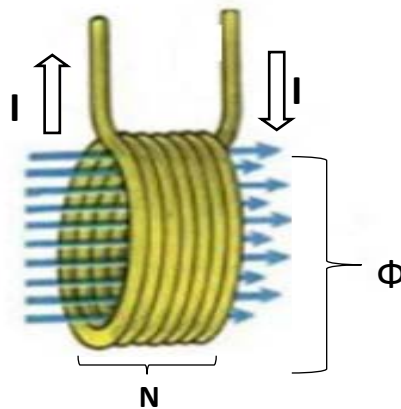


Fig.I.5 loi de faraday

La polarité de la tension induite dépend exclusivement de la façon dont le flux varie à l'intérieur de la spire. Alors que la loi de Faraday permet de trouver la valeur de la tension induite, la loi de Lenz permet d'en déterminer sa polarité. [2] [14]

I.5 Loi de Lenz

Soit un flux inducteur dont la variation induit une tension E dans une bobine.

La polarité de la tension induite E est telle qu'elle tend à faire circuler dans la bobine un courant I_2 dans le flux ϕ_2 s'oppose à la variation du flux ϕ_1 . [14]

I.6 La règle de la main droite

La règle de la main droite permet de trouver la face nord : Le pouce de la main droite sort par la face nord de la bobine lorsque les autres doigts indiquent le sens du courant d'intensité i . [14]

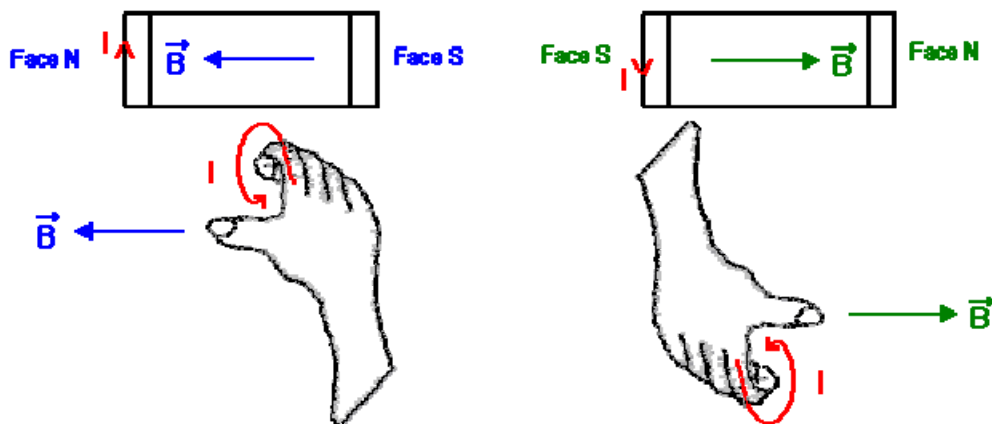


Fig.I.6 La règle de la main droite

I.7 L'alternateur

I.7.1 Définition :

Un alternateur est une machine synchrone qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif. Cette machine est constituée d'un rotor (partie tournante) et d'un stator (partie fixe). [3][5]

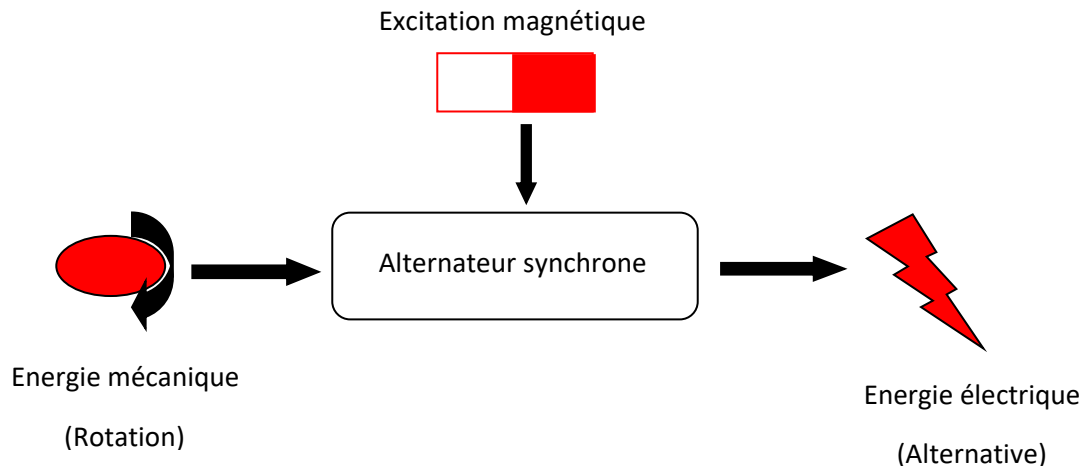
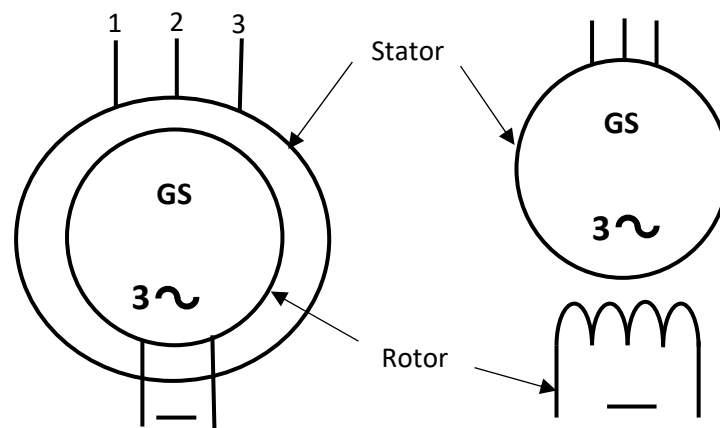


Fig.I.7 Conversion énergétique réalisée par l'alternateur synchrone [9]

I.7.2 Symbole électrique

Les symboles électriques utilisés pour représenter un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné sont représenté sur la Figure I.8 [5] [13]



GS : Génératrice synchrone

— : Courant continu

[11]

Fig.I.8 Symboles électriques d'un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné

I.7.3 Les constitutions d'un alternateur

A) Le stator (l'induit) :

Il est constitué d'enroulements qui vent être siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux de champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. [3]

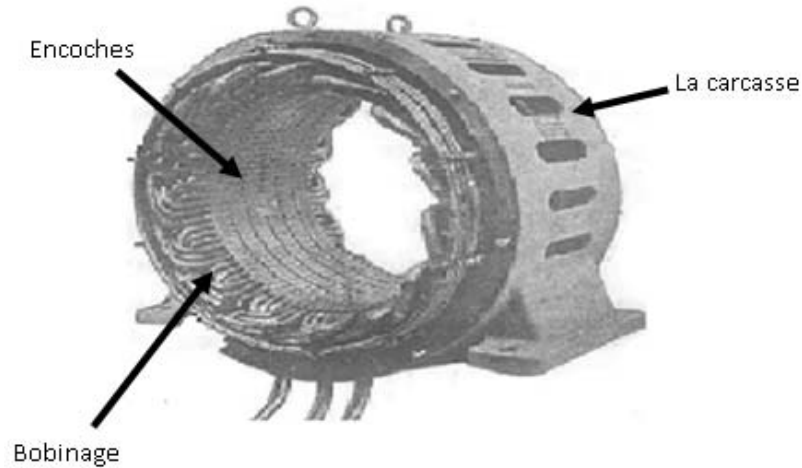


Fig.I.9 structure d'un stator

B) Bagues collectrices et les balais :

Les bagues collectrices sont montées sur l'arbre du rotor et branchées aux extrémités de l'enroulement inducteur. [7]

Des balais en carbone sont maintenus en contact avec la surface des bagues à l'aide de ressorts. Ce mécanisme permet de brancher l'enroulement inducteur à une source d'énergie extérieure, responsable de son alimentation. Pour que l'ensemble bagues/balais fonctionne bien, il importe de maintenir une pression constante sur les balais. [7]

Le ressort doit donc remplir efficacement cette fonction pendant toute la durée de vie des balais. La Figure I.10 illustre l'action du ressort sur les balais neufs et usés.

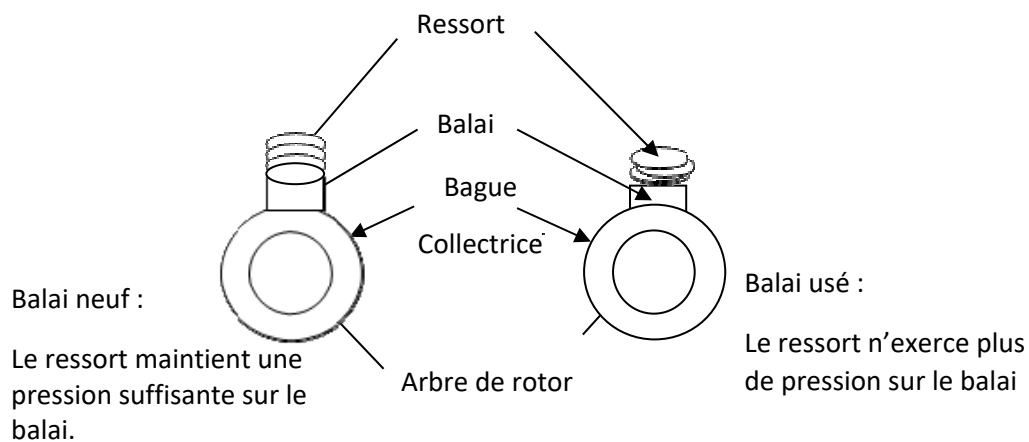


Fig.I.10 Action du ressort sur les balais

C) Le rotor (l'inducteur)

Il peut être constitué d'un aimant permanent (généralisant donc un champ constant), dans ce cas la tension délivrée par la machine n'est pas réglable et sa valeur efficace et sa fréquence varie avec la vitesse de rotation. [3]

Plus couramment un électro-aimant assure l'induction. Ce bobinage est alimenté en courant continu, soit à l'aide d'un collecteur à bague rotatif (une double bague avec balais) amenant une source extérieure, soit par un exciteur à diodes tournantes et sans balais. Un système de régulation permet l'ajustement de la tension et de la phase du courant produit. [3]

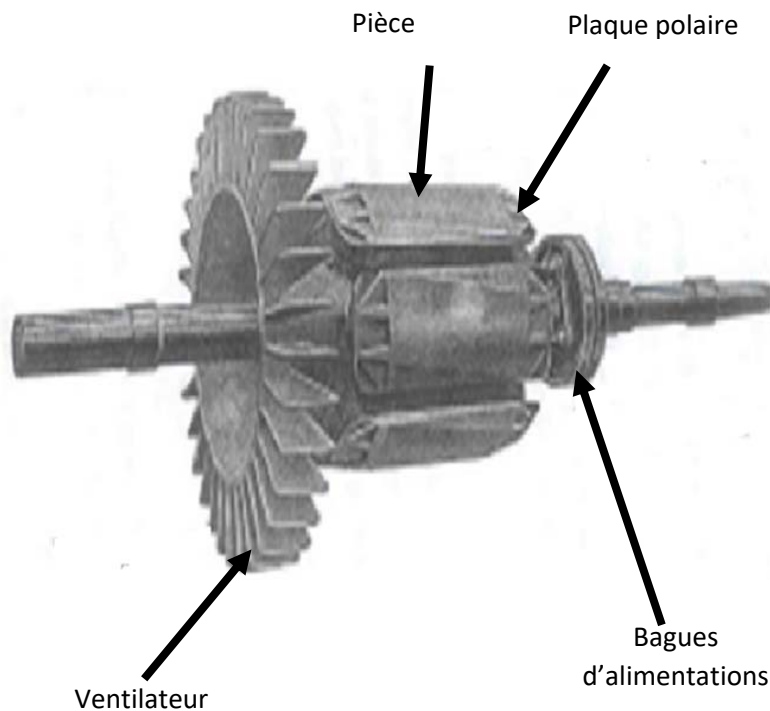


Fig.I.11 structure du rotor d'alternateur [6]

On remarque sur la fig. I.11: la forme des pôles, des deux bagues amenant le courant continu d'excitation et le ventilateur de refroidissement calé sur l'arbre [6]

D) Ventilateur

Le générateur synchrone se caractérise par son système d'auto-ventilation. Un ventilateur centrifuge, monté entre la roue polaire et le palier avant, fait circuler l'air

dans la machine. L'aspiration se fait à l'arrière de la machine et le refoulement coté bout d'arbre. Le ventilateur est composé soit d'un noyau monté sur l'arbre avec flasque en acier soudé, fixé sur le moyeu par des vis à têtes hexagonales, soit d'un ventilateur monobloc en alliage d'aluminium fretté sur l'arbre. L'air sort radialement par effet centrifuge. [4]

I.7.3 Types d'alternateur

1. Alternateur à rotor à pôles saillants :

La partie avant de l'arbre on a deux bagues de prise de courant. Ce rotor est employé dans les machines à vitesse réduite de l'ordre de 1000 à 1500 tr/mn comme les turbines hydrauliques (alternateurs hydrauliques). [5]

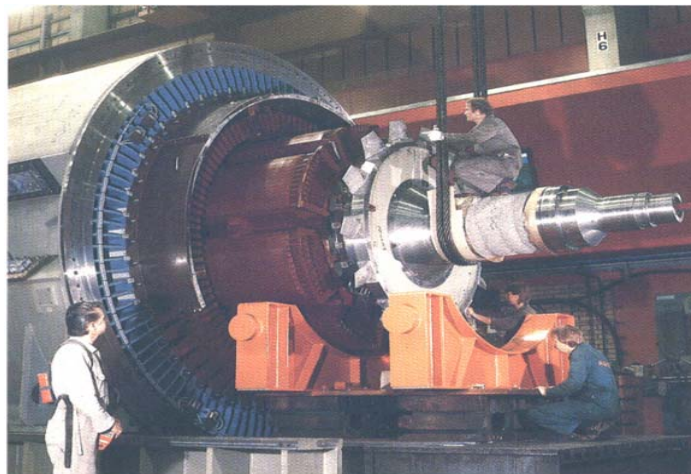


Fig.I.12 rotor d'une machine synchrone à pôles saillants [10]

2. Alternateur à rotor à pôles lisses

Ce rotor est réalisé sous forme d'un cylindre sans pôles saillants. Il est employé dans les machines à grande vitesse de l'ordre de 1500 à 3000 tr/min comme les turbines à vapeur (les turbo-alternateurs). [5]

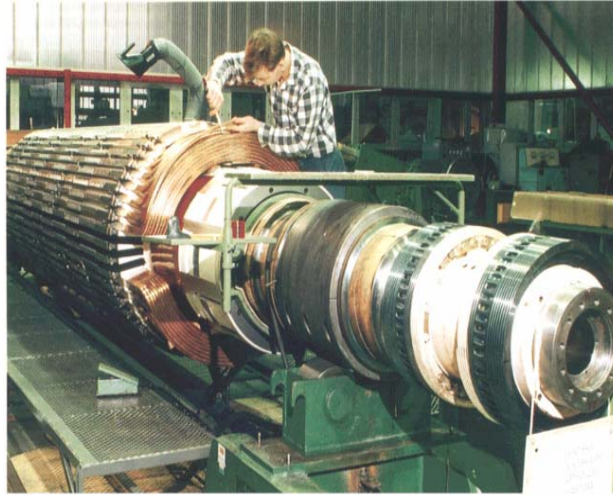


Fig.I.13 rotor d'une machine synchrone à pôles lisses [10]

I.7.5 Principe de fonctionnement :

Les machines synchrones sont largement employées dans l'industrie nationale comme alternateur, c'est-à-dire générateur de courants alternatifs, principalement de grande puissance. Pratiquement, toutes les centrales électriques sont équipées d'alternateurs synchrones. La puissance des gros alternateurs moderne se chiffre par des dizaines et des centaines de milliers de kilo Volt ampères. De même que toute machine électromagnétique, [5]

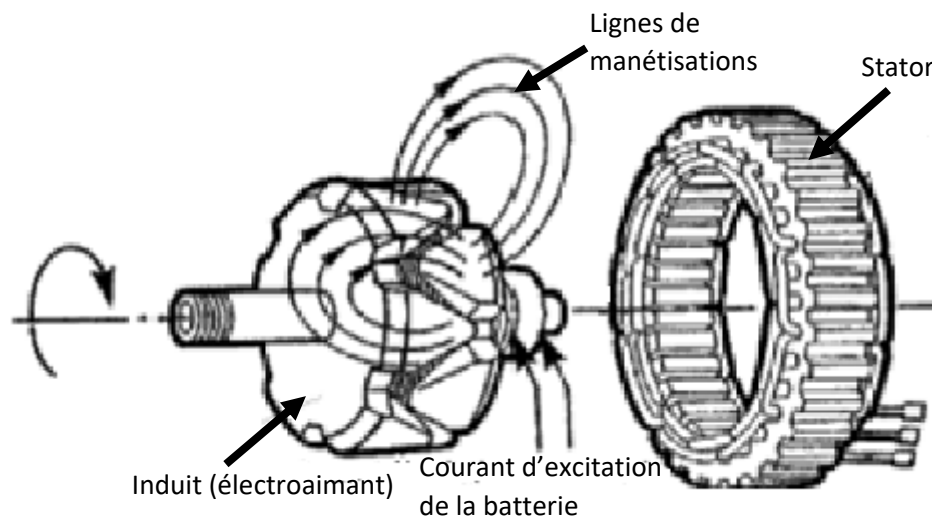


Fig.I.14 principe de la production de courant dans l'alternateur []

A. Création de forces électromotrices triphasées :

La conversion électromécanique s'opère par interaction entre un champ magnétique inducteur et des conducteurs, aux bornes desquels apparaît une force électromotrice induite. En effet, si l'on place une bobine de N spires dans un flux variable, elle est le siège d'une force électromotrice $e(t) = -N \cdot d\varphi(t)/dt$. Si le bobinage du stator est triphasé, on obtient trois forces électromotrices induites déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle $2\pi/3$, si le flux magnétique est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi. Elle a comme valeur efficace : [5] [13]

$$E = K_b \cdot N_c \cdot f \cdot \varphi \quad (1.2)$$

K_b : Facteur de bobinage,

N_c : Nombre des conducteurs par phase,

f : Fréquence en Hz,

φ : Flux utile par pôle

B. Fonctionnement à vide :

En marche à vide, le courant statorique d'un alternateur est nul. La fig.I.15 représente le schéma d'un alternateur triphasé. L'arbre de la machine représenté en traits interrompus est accouplé à un moteur qui l'entraîne en rotation avec une vitesse constante n_0 . L'intensité du courant d'excitation I_{ext} alimentant le circuit de rotor depuis une source extérieure à courant continu peut être réglée dans les limites de zéro à une certaine valeur maximale. Cela permet de faire varier le flux magnétique inducteur dans la large limite, c'est-à-dire d'obtenir les valeurs différentes de la F.E.M du stator, parce que cette F.E.M est proportionnelle au flux magnétique du rotor, cherchons la variation de la F.E.M en fonction du courant d'excitation en marche à vide lorsque le circuit du stator est ouvert. [5] [6]

On donne aux épanouissements polaires du rotor une forme telle que la répartition du flux magnétique suit la circonférence du stator de la machine soit aussi voisine que possible d'une répartition sinusoïdale, [5]

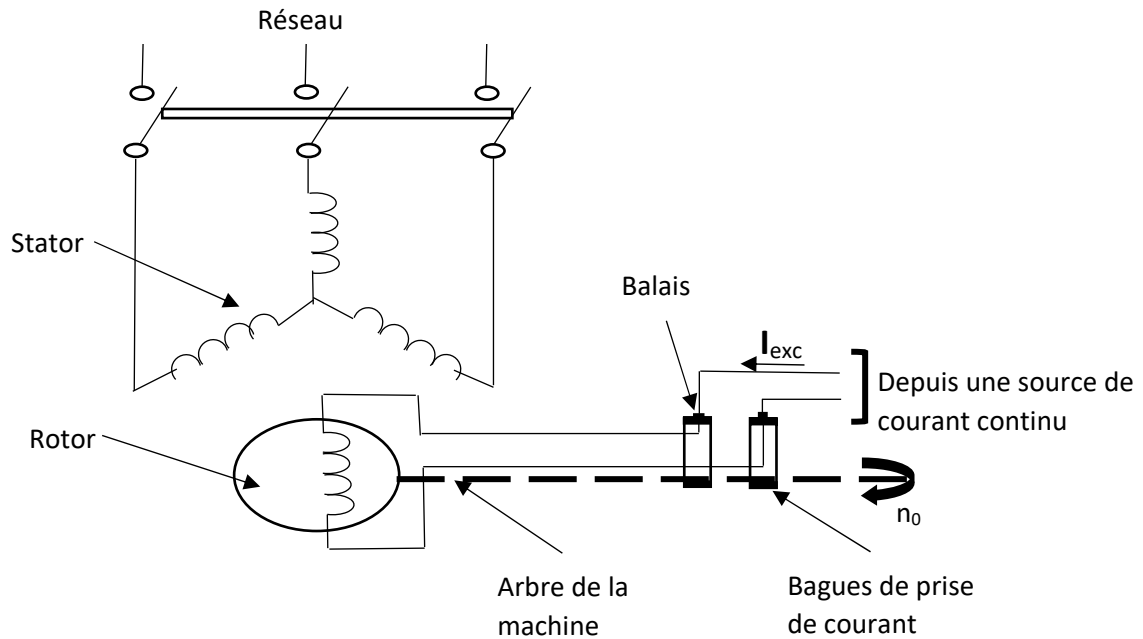


Fig.I.15 schéma d'un alternateur synchrone [5]

C. Fonctionnement en charge

Lorsque des courants triphasés équilibrés parcourent l'induit, ils engendrent (théorème de Ferraris) une induction tournante à p paires de pôles, dont la vitesse N_S est égale à celle du rotor. [10] [13]

On aura donc simultanément dans une machine synchrone deux inductions Tournantes, à la vitesse N_S :

- L'induction B_R créée par l'inducteur tournant ;
- L'induction B_S engendrée par le stator. Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la F.é.m. induite E et le courant d'induit I dans une phase.

Si E et I sont déphasés de Ψ , le décalage, en angle électrique, de B_R et B_S est $(2\pi + \Psi)$.

En effet, nous avons vu que l'induction B_S était dans l'axe d'une bobine quand le courant y était maximum alors que la f.é.m. était maximale quand l'induction B_R était normale à l'axe.

Si la machine n'est pas saturée, on peut superposer les effets des deux inducteurs et l'étude est particulièrement simple. [10] [13]

I.7.6 Couplage des Alternateurs

Nous réalisons bien une mise en parallèle. Il va de soi que nous devons respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs ou plus en parallèle. En effet, comme le réseau est lui-même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous, nous envisageons également d'alimenter le réseau [13]

I.6.6.1 Conditions de couplage

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même avec un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants :

- **La même fréquence :**

Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie par un alternateur synchrone dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Cette dernière est fonction de la vitesse du rotor donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation

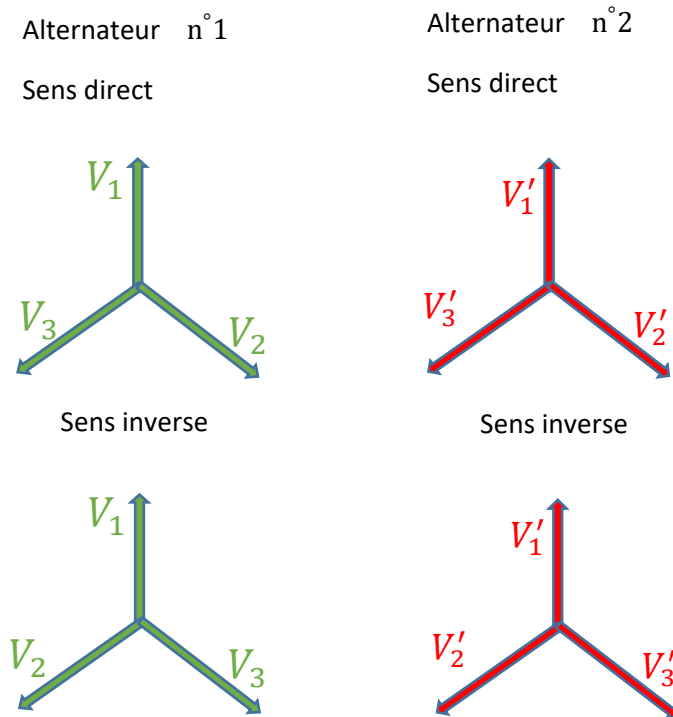
- **La même tension :**

Nous savons que pour qu'un alternateur synchrone délivre une tension, nous devons impérativement vérifier deux choses, la présence d'un flux d'une part et une variation de ce flux d'autre part. Pour ce dernier point nous en avons parlé ci-dessus. Pour ce qui est de la valeur du flux, nous savons qu'il est fonction du courant d'excitation. Le flux lui va induire les bobinages statoriques qui seront le siège de la FEM. Comme la tension est aux chutes de tension près égale à la FEM, je peux dire que la tension sera réglée par ce même courant d'excitation

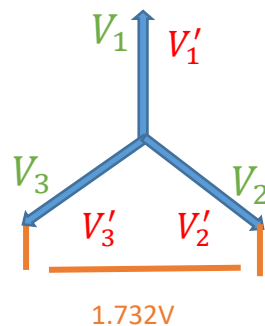
- **La même succession des phases :**

Soit les deux alternateurs représentés ci-dessous

Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identiques et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :



Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V'_1 sont identiques et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V'_1 est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :



Dans cette configuration, on remarque que le potentiel entre V_2 et V'_2 est maximum ce qui montre bien que dans de telles conditions nous ne pourrions en aucun cas réaliser la mise en parallèle car nous aurons un flash au commutateur. Nous devons donc réaliser la succession des phases de telle sorte qu'en tout moment, V_1 soit sur V'_1 , V_2 soit sur V'_2 et V_3 soit sur V'_3 . Cette mise en phase peut être réalisée

soit en inversant le sens de rotation du moteur d'entraînement d'un des alternateurs
soit en inversant deux phases sur l'un des alternateurs

En pratique

En pratique, la fréquence est vérifiée à l'aide d'un fréquencemètre et la tension à l'aide d'un voltmètre. La succession des phases est vérifiée à l'aide de feux lumineux.

Précisons encore que dans la pratique nous considérerons que le réseau de vecteurs de l'alternateur principal sera fixe et que c'est le réseau de vecteurs de l'alternateur à accoupler qui tourne. Nous pourrions réagir et dire que si les fréquences sont identiques, les réseaux ne devraient pas se mettre en rotation l'un par rapport à l'autre. Il ne faut pas oublier qu'en pratique il nous sera impossible de garantir une fréquence identique, rien que par le fait que la fréquence du réseau peut avoir une légère oscillation et que de plus les appareils de mesure que nous allons utiliser ont eux aussi leur précision.

I.7.7 Excitations des alternateurs

L'excitation est très importante dans la machine synchrone quand la machine travaille comme générateur parce que le système peut régler la quantité de puissance réactive cédée ou absorbée par le générateur.

Pour générer le champ magnétique nécessaire dans les alternateurs on utilise des aimants permanents ou électroaimants. Ces derniers ont besoin d'un courant continu pour générer un champ qui ne varie pas dans le temps. Ce courant peut être fourni par différents systèmes d'excitations. Le rôle du système d'excitation est d'alimenter le rotor de l'alternateur avec un courant continu permettant de magnétiser la machine.

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones se distinguent selon les types suivants. [10] [12]

- Système d'excitation à courant continu (DC)
- Système d'excitation à courant alternatif (AC)
- Système d'excitation statique.
- Auto-alimentation
- Excitation shunt

- Excitation compound
- Excitation shunt avec régulation électronique
- Emploi d'une dynamo excitatrice
- Emploi d'un alternateur d'excitation

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 synchronisée à travers des bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice et peut soit auto excitée soit excitée séparément. [10] [8]

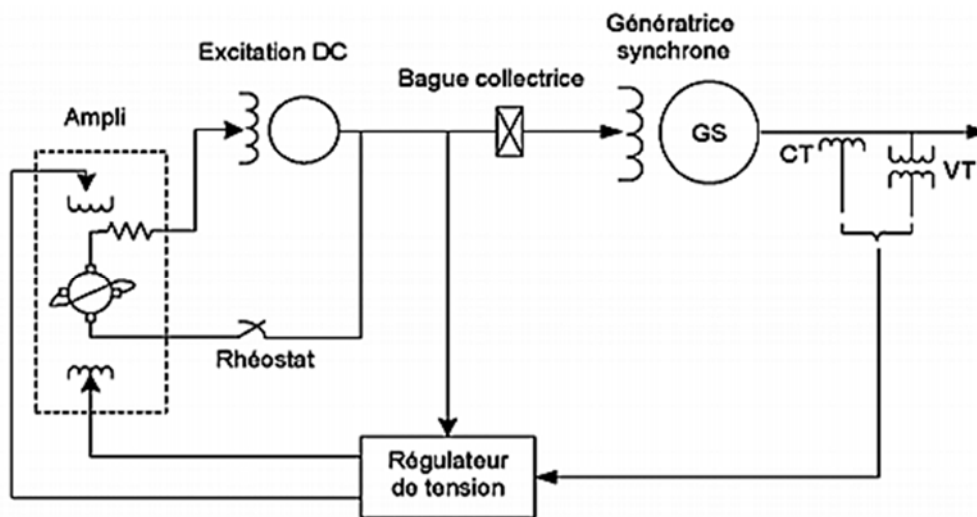


Fig.I.16 système d'excitation de type DC

2. Système d'excitation à courant alternatif (AC)

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant de la machine synchronisée 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 champ au niveau de l'excitation. Les Figures I.17 et I.18 montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement [10] [8]

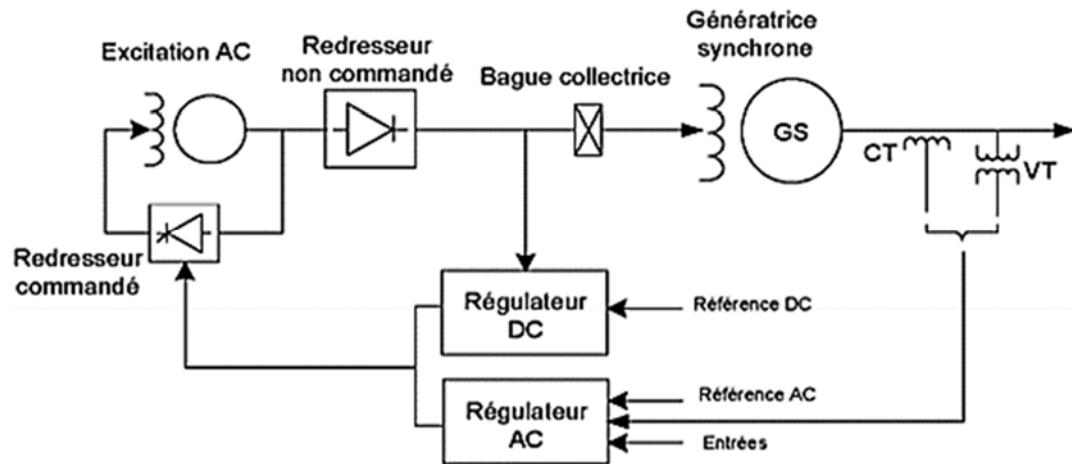


Fig.I.17 excitation de type AC avec redresseur non commandé

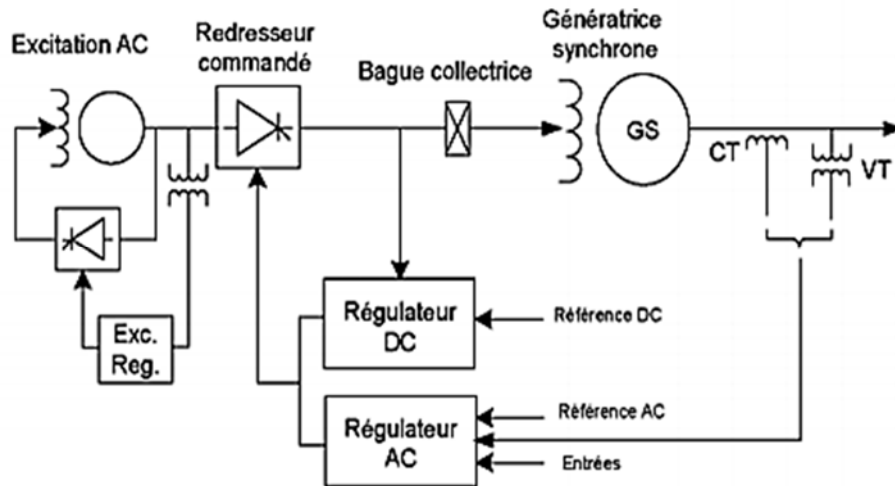


Fig.I.18 excitation de type AC avec redresseur commandé

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. La Figure I.19 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.

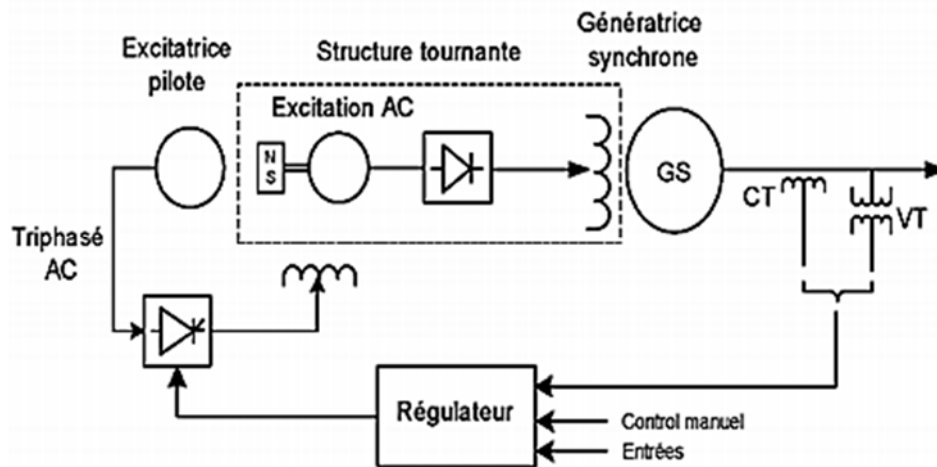


Fig.I.19 : l'excitation AC de type Brushless

3. Système d'excitation statique :

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. La source de courant continu est constituée par un transformateur branché à la sortie du générateur, un redresseur qui convertit le courant alternatif en courant continu et un système de balais et collecteurs tournants qui transmettent le courant de la source à la bobine du rotor. Le contrôle de la tension s'effectue dans le pont de diodes qui peut régler l'amplitude de la tension de sortie. [12]

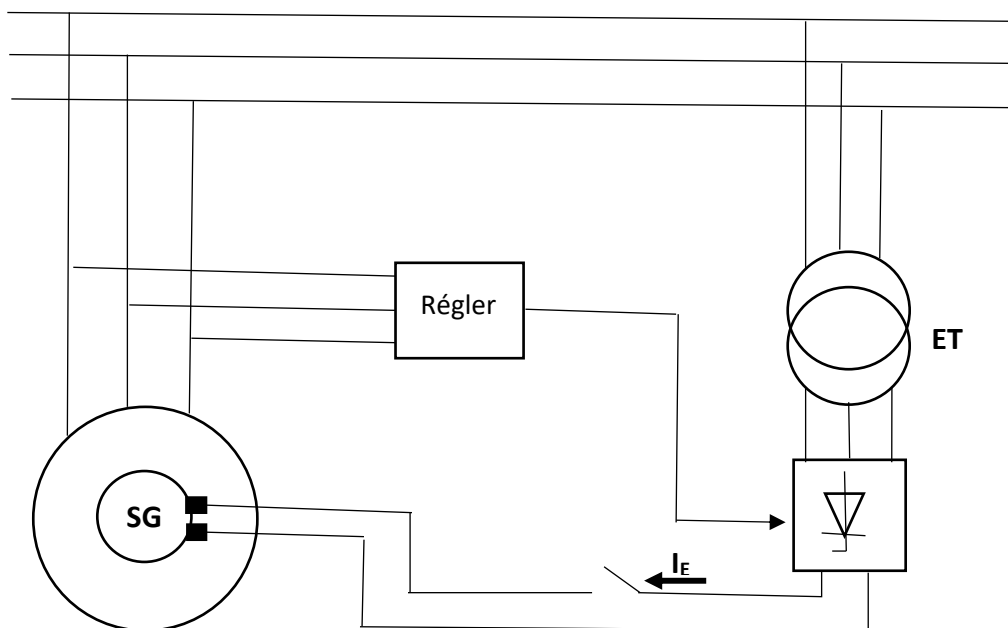


Figure I.20 Système d'excitation statique

4. Auto-alimentation

Dans cette structure, le pont à thyristors alimentant la roue polaire est lui-même alimenté par la sortie de la GP (En utilisant un transformateur de tension ou (et) un transformateur de courant) [Wet97]. La figure I.21 montre le principe de cette structure d'excitation [8] [10]

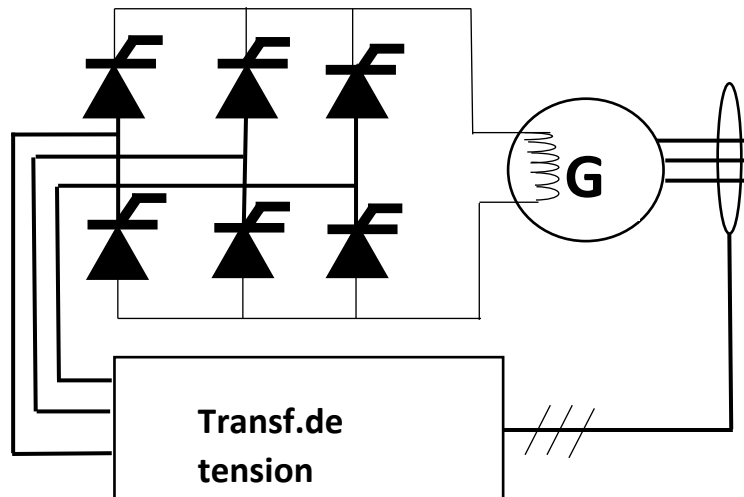


Fig.I.21 Principe d'excitation par auto-alimentation

On note qu'en général, la tension due aux flux rémanents de la GP est trop faible pour permettre l'amorçage et il faut donc utiliser une source auxiliaire (une batterie par exemple). [13]

5. Excitation shunt

On prélève l'énergie nécessaire à l'excitation à la sortie de l'induit. Un redresseur (G) (ensemble de diodes de puissance) est nécessaire. [9] [16]

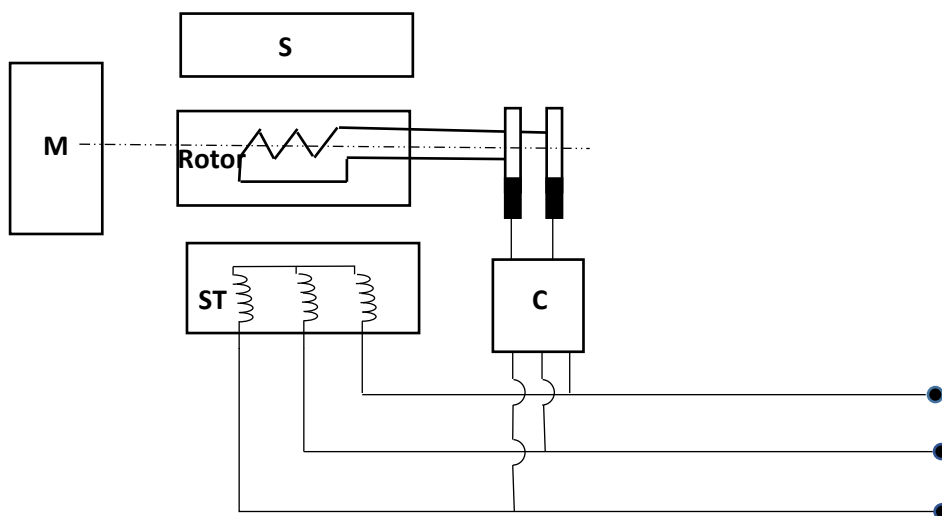


Fig.I.22 Excitation shunt

6. Excitation compound (obsolète)

On peut tenir compte du courant débité, mais cela nécessite une somme vectorielle. Par rapport au système shunt, on utilise un inducteur à faible résistance et on limite le courant par une inductance placée avant le redresseur.

L'effet compound est obtenu en ajoutant, côté alternatif, un courant proportionnel au courant débité. [9] [16]

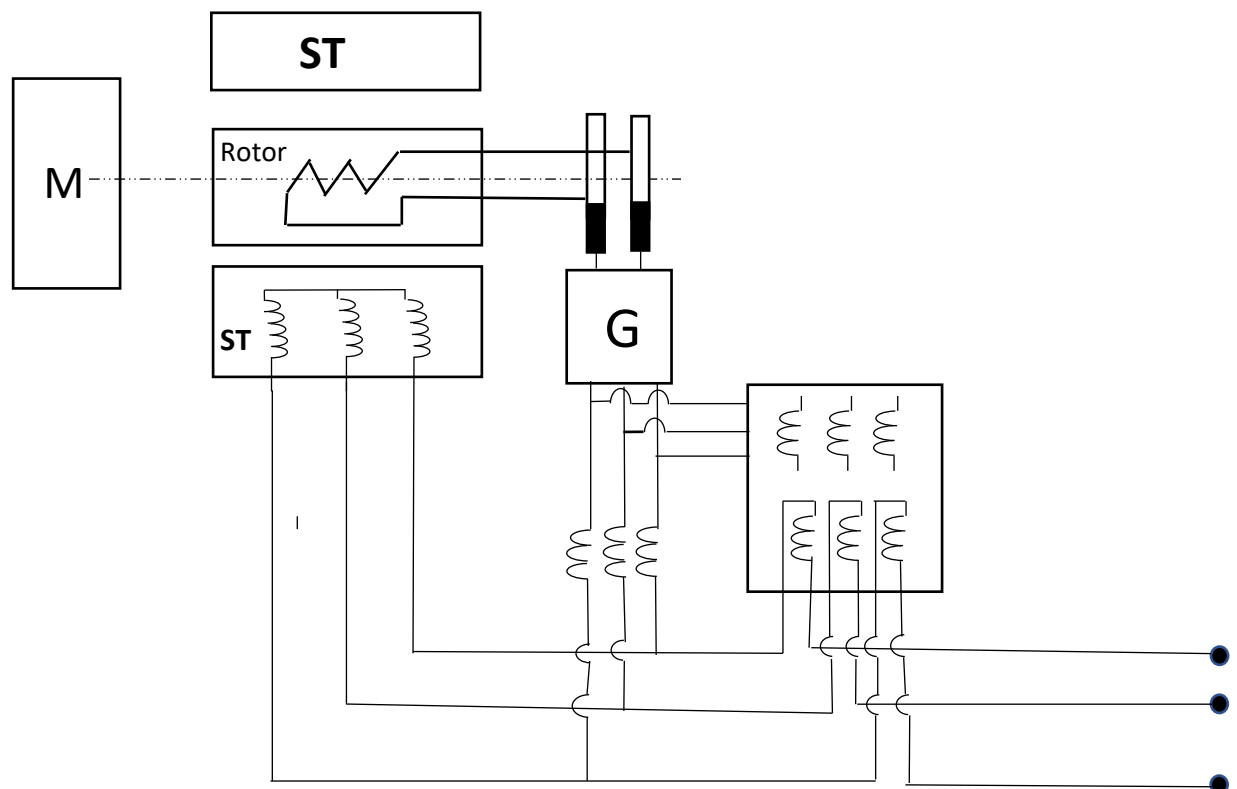


Fig.I.23 Excitation compound (obsolète)

7. Excitation shunt avec régulation électronique

On remplace le redresseur à diode par un redresseur commandé (à thyristors). Un régulateur (R) mesure la tension de sortie et ajuste le courant d'excitation en conséquence. [9][16]

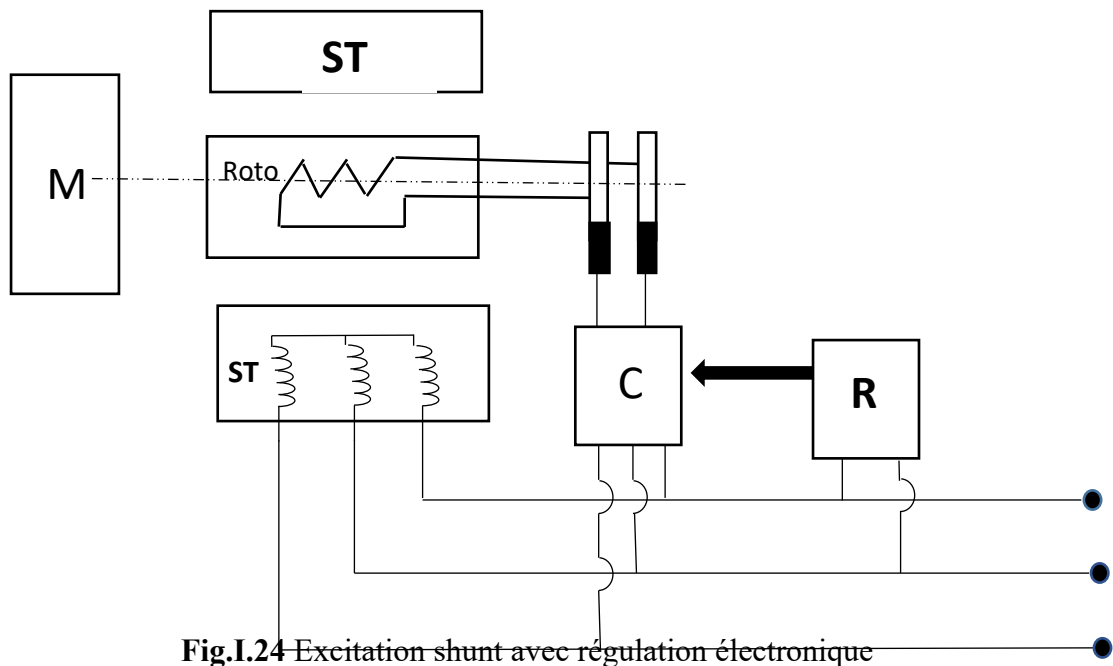


Fig.I.24 Excitation shunt avec régulation électronique

8. Emploi d'une dynamo excitatrice

Une dynamo est une machine DC utilisée en génératrice. Une partie de l'énergie mécanique peut être utilisée par une telle machine (E) pour fournir le courant d'excitation de l'alternateur. [9] [16]

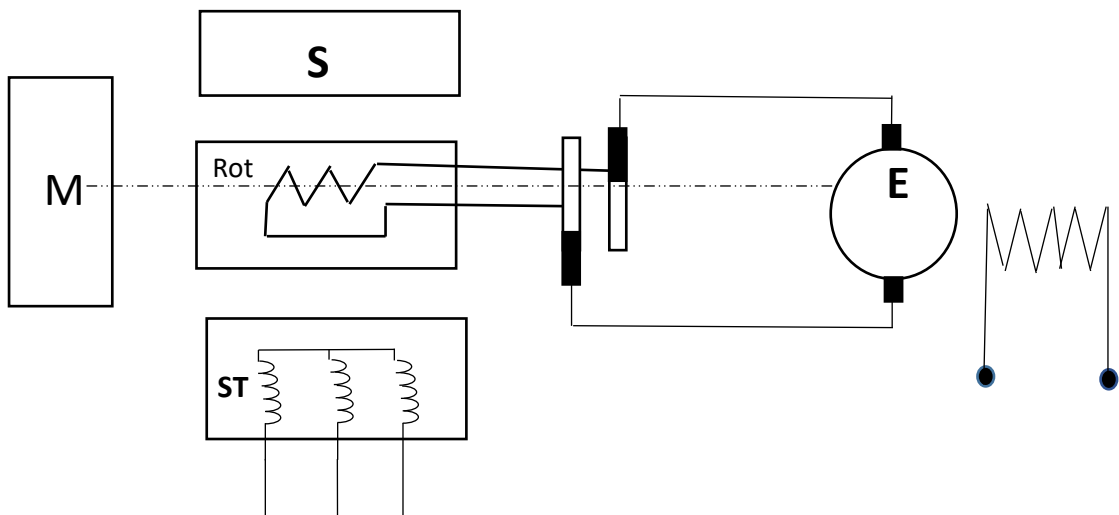


Fig.I.25 Emploi d'une dynamo excitatrice

9. Emploi d'un alternateur d'excitation (système « bushes »)

Dans le cas des gros alternateurs (A), la génératrice d'excitation (E) est souvent un alternateur inversé suivi d'un redresseur fixé sur l'axe (donc tournant

avec celui-ci). Il y a parfois une troisième machine (P), de petite taille, pour exciter la seconde ! Cette dernière est commandée par le régulateur (R). [9] [16]

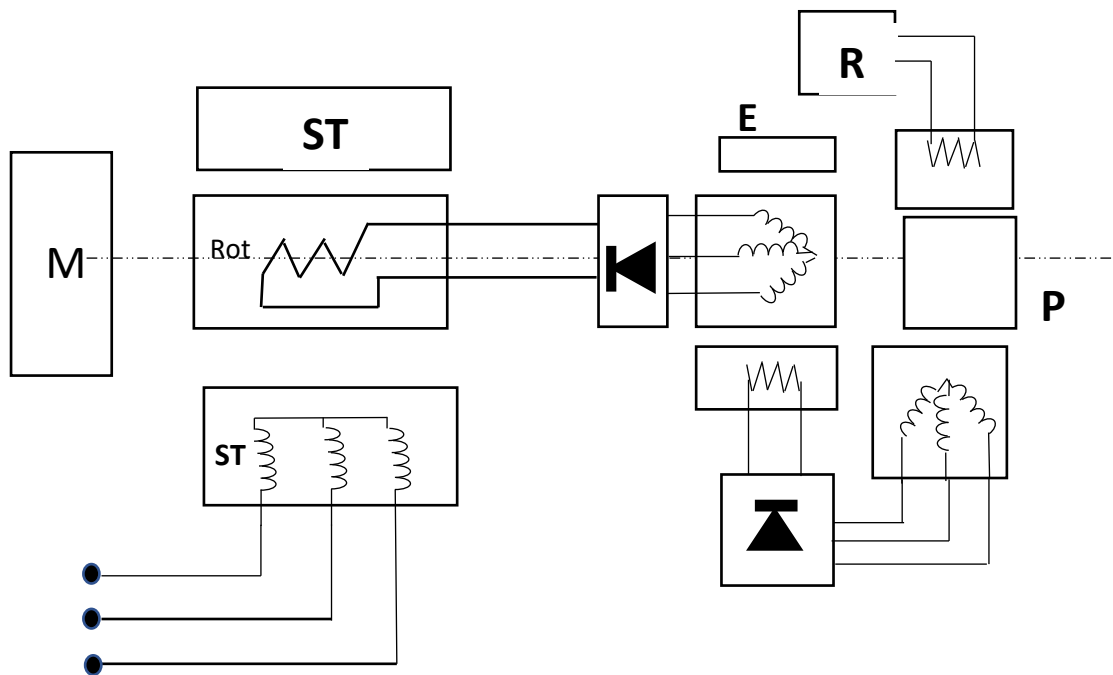


Fig.I.26 Emploi d'un alternateur d'excitation (système « bushes »)

I.8 Les différents types des centrales électriques :

L'électricité peut être produite par de nombreux types d'installations, On peut distinguer quatre types de centrales de production d'électricité : thermiques, hydroélectriques, nucléaires et éolienne. La centrale électrique est un bâtiment industriel qui produit de l'électricité. Cependant, en fonction du type de centrale, l'électricité n'est pas générée de la même manière. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturellement énergie électrique C'est principalement grâce à elle que les consommateurs, les particuliers et les entreprises, peuvent bénéficier d'un réseau électrique [15]. Le type de turbine définit alors le type de la centrale électrique :

- Une turbine à vapeur, dans une centrale thermique (à combustible fossile ou nucléaire)
- Une turbine à combustion (communément, mais improprement appelée turbine à gaz), dans une centrale thermique ;

- Une turbine hydraulique, dans une centrale hydroélectrique ou un central marémoteur
- Une éolienne est aussi une sorte de turbine. Ainsi en trouve des différents types des turbo-alternateurs [15]

I.8.1 Centrale hydraulique :

Les centrales hydroélectriques gravitaires fonctionnent à partir d'eaux dont le mouvement est entraîné par la gravité (chutes d'eau, cours d'eau). Ce sont les centrales hydroélectriques les plus nombreuses. Un barrage peut être construit pour maximiser la production d'électricité en créant une importante retenue d'eau en amont de la turbine. Plus le volume d'eau retenu est important et plus la hauteur de la chute est importante, et plus le barrage est susceptible de produire d'électricité [2]

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont des centrales hydroélectriques particulières, permettant une forme intéressante de stockage de l'énergie. Lorsque la demande d'électricité est faible et que les prix de l'électricité sont bas, les stations de transfert d'énergie par pompage sont consommatrices d'électricité

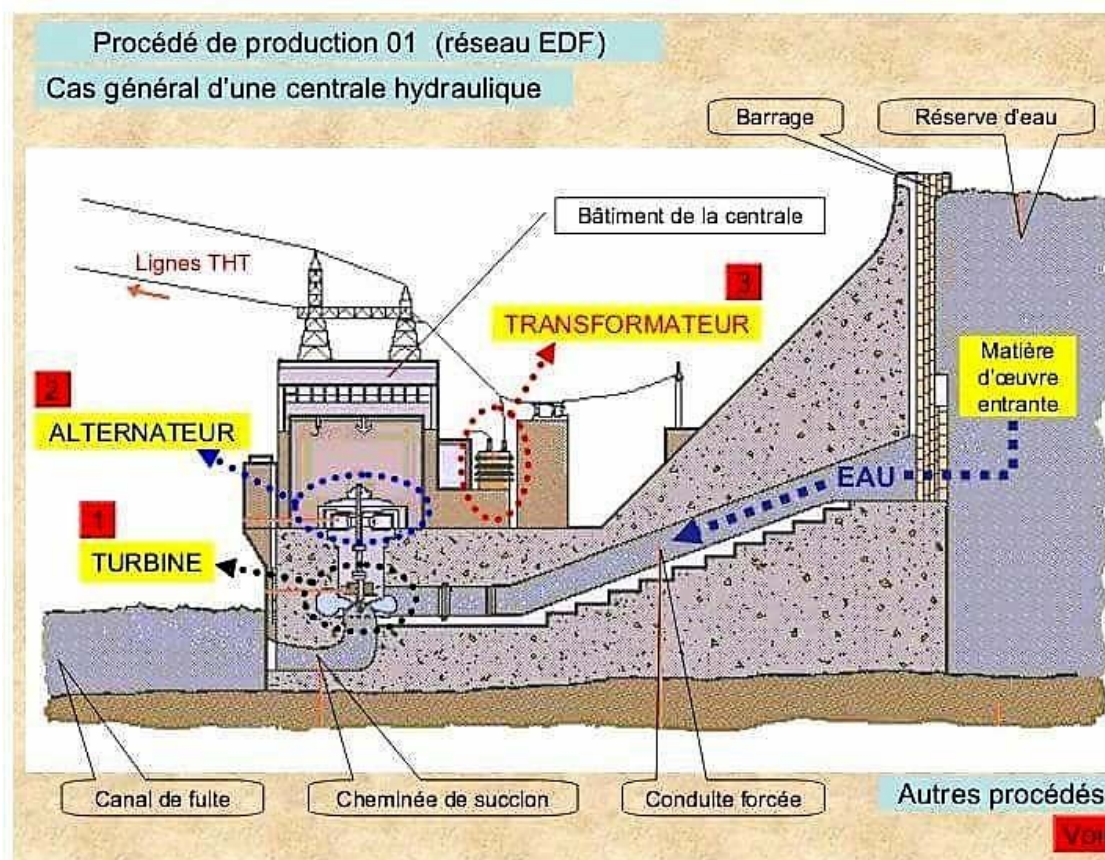


Figure I.27 schéma d'une centrale hydroélectrique [7]

Pour pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. En période de pic de consommation d'électricité, lorsque les prix de l'électricité sont élevés, la station de transfert d'énergie par pompage produit de l'électricité hydroélectrique en lâchant l'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur. [16]

Enfin, les centrales hydroélectriques peuvent prendre la forme moins conventionnelle des usines marémotrices, capables de transformer en électricité les mouvements d'eaux liés aux marées (centrales marémotrices au sens strict), aux courants marins (hydroliennes) ou aux vagues (en surface). [15]

I.8.2 Centrale thermique

- Les centrales à flamme comprennent
- Les centrales conventionnelles dans lesquelles un combustible fossile (charbon, fioul, gaz naturel...) ou autre (biomasse) est brûlé dans une chaudière pour produire la vapeur surchauffée alimentant la turbine ;
- Les centrales à turbine à combustion, à simple cycle, brûlant généralement du gaz, parfois du fioul (léger ou lourd réchauffé) ;
- Les centrales à cycle combiné, brûlant les mêmes combustibles que dans un simple cycle, mais avec un bien meilleur rendement grâce à l'adjonction d'une chaudière de récupération et d'une turbine à vapeur.
- Les centrales à moteur Diesel ou moteur à gaz [3]

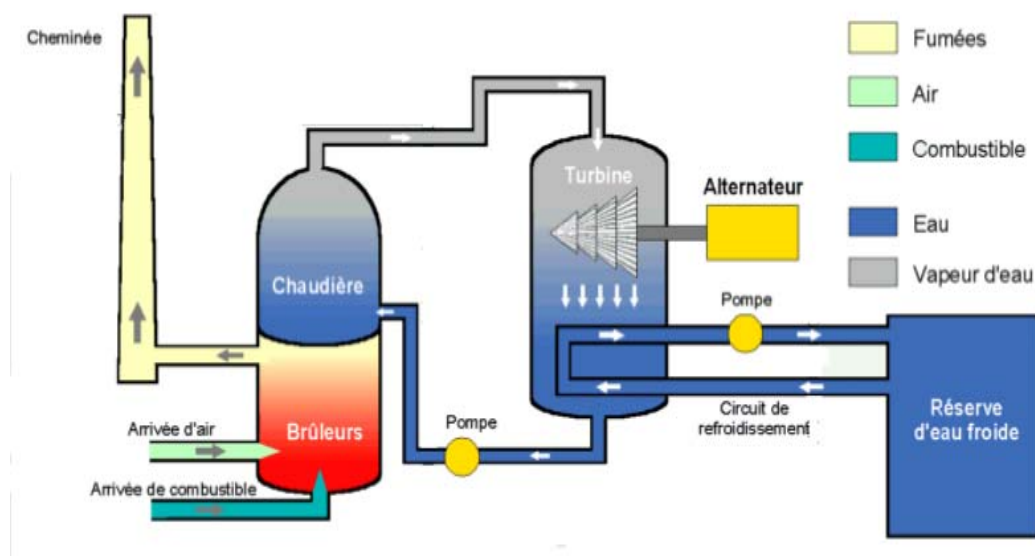


Figure I.28 Schéma d'une centrale thermique à flamme [7]

I.8.3 Centrale éolienne

Une centrale éolienne est une centrale de production d'électricité grâce à l'énergie du vent. Le nom éolien vient du nom du dieu grec des vents, Eole. Une éolienne se compose d'un mat au sommet duquel est montée une hélice composée de pales qui actionnent une turbine en tournant. Un groupe d'éoliennes peut être appelé ferme éolienne ou centrale éolienne. L'éolien est une énergie propre comme le solaire, la géothermie, l'énergie marémotrice, l'énergie hydraulique ou la biomasse. [13]

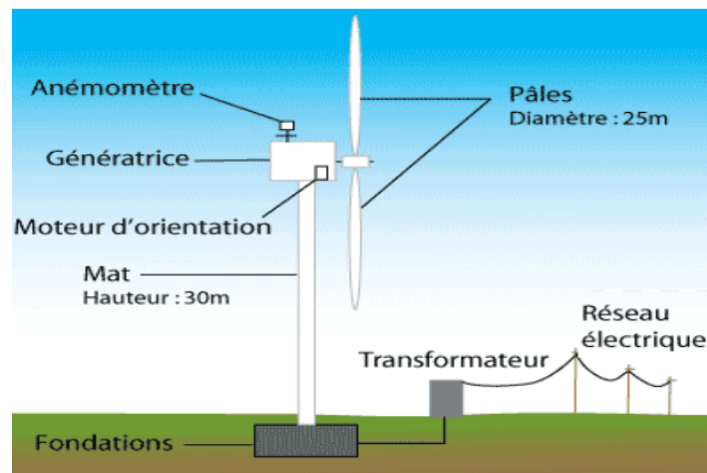


Fig. I.29 schéma d'une centrale éolienne [7]

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie et le principe de fonctionnement de l'alternateur. L'alternateur est l'élément principal dans l'opération de production de l'énergie électrique qu'on utilise quotidiennement dans notre vie.

Nous avons traité en détail la constitution de l'alternateur, son fonctionnement à vide et en charge, son excitation ainsi son couplage sur le réseau. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de l'alternateur.

CHAPITRE II

Modélisation de l'alternateur

La régulation de tension de l'alternateur de puissance nécessite d'avoir un modèle mathématique, ce modèle devra prendre en compte les paramètres techniques de l'alternateur à étudier.

Nous avons modélisé l'alternateur selon deux méthodes : Le modèle en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine et le modèle de la transformation de Park.

Nous allons présenter dans ce chapitre un modèle de Park (transformation de Park) appliqué sur la machine synchrone pour simplifier la description mathématique.

II.1 Structure générale de la machine synchrone

La machine que nous allons étudier par la mise en équations correspond à la structure représentée par la figure II.1. C'est une machine synchrone triphasée, équilibrée dont le rotor est muni d'un système d'aimants permanents, assurant une répartition d'induction sinusoïdale dans l'entrefer. Ce rotor ne comporte ni amortisseurs, ni pièces polaires. L'absence de pièces polaires donne à la machine la structure d'une machine à pôles lisses. Le stator comporte trois axes a, b, c identiques et décalés entre eux d'un angle électrique de $2\pi/3$. [1]

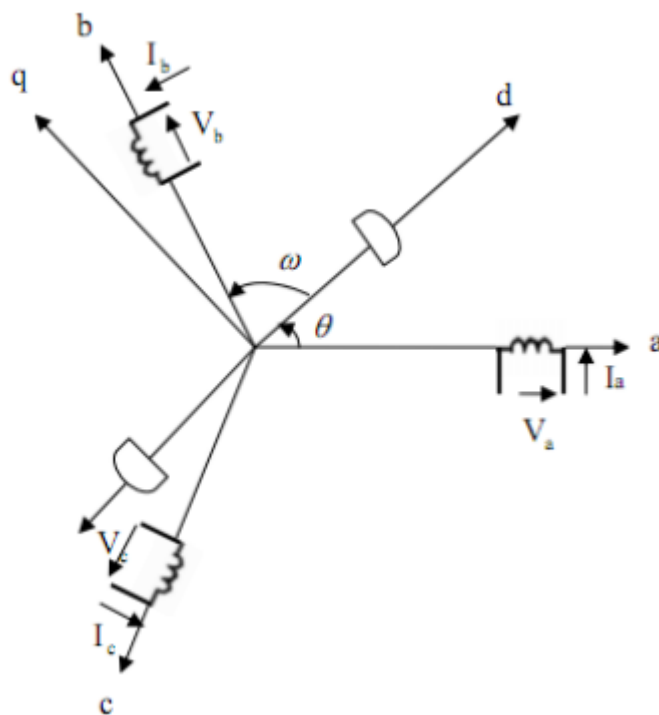


Fig.II.1 Représentation d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents

La modélisation des machines électriques en vue de leur commande exige la prise en compte de certaines hypothèses simplificatrices, et se base sur 3 types d'équations :

La f.é.m. de la machine synchrone est donnée par la relation suivante : [2]

$$E = V_s + r_a \cdot I_s + j X_d \cdot I_s \quad (2.1)$$

E : F.é.m. transitoire de la machine synchrone.

V_s : Tension aux bornes de la machine.

I_s : Courant de la machine.

r_a : Résistance statorique de la machine.

X_d : Réactance transitoire de la machine.

La représentation de la machine synchrone utilisée pour la solution du réseau et le diagramme de phase sont schématisés dans la figure suivante :

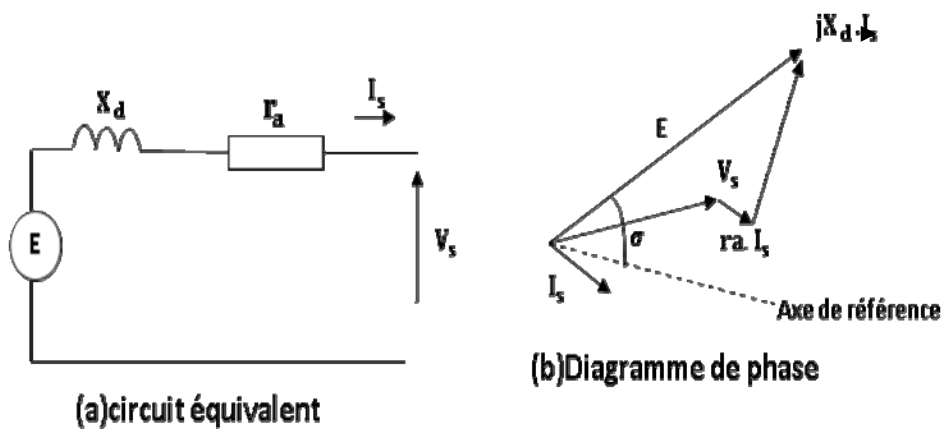


Fig. II.2 Représentation simplifié d'une machine synchrone

II.2 Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné :

II.2.1 Modèle linéaire :

Les équations différentielles, qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone triphasée, sont caractérisées par des coefficients qui dépendent du temps, d'où la difficulté de leurs résolutions. Pour la machine synchrone, la seule transformation qui peut éliminer le problème de dépendance du temps dans la matrice inductance, est celle représentée par le référentiel tournant avec le rotor. Le modèle traditionnel de la

décomposition vectorielle spatiale et temporelle tant des champs magnétiques que des courants dans les machines synchrones (machines électriques en général) est extrêmement utilisée. Ce modèle (connu sous le nom de modèle de Park) permet de simuler de façon simple le comportement en régime transitoire ou permanent de ces machines. [32] [20]

Les détails de l'élaboration du modèle de Park ont été traités dans de nombreux ouvrages d'électrotechnique. Aussi nous nous limiterons à en donner les approximations essentielles.

Le modèle de Park est de caractère linéaire, cependant, en pratique la saturation des machines peut affecter de manière importante leur comportement et il est nécessaire de composer avec cette réalité. Dans le modèle de Park la représentation des effets des amortisseurs est réalisée par un nombre réduit de circuits stationnaires à constantes localisées sur des court-circuit et placés dans les deux axes direct et quadrature du modèle. Cette représentation des effets des amortisseurs reste un problème délicat qui peut, dans certaines conditions, être responsable de différences notables entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation. [20] [32]

II.2.2 Modèle de Park :

L'étude des machines électriques à partir de la transformée de Park a déjà été longuement traitée dans plusieurs ouvrages et publications spécialisées. Ce modèle permet, par un changement de référentiel, de passer du système statorique au système rotorique avec élimination au passage de certaines variables. Le changement de référentiel permet de passer à une machine bipolaire équivalente, dont l'étude est certainement plus facile. Ensuite par une transformation inverse on peut revenir au modèle triphasé afin d'obtenir les grandeurs caractéristiques « naturelles » de la machine. Le modèle de base consiste à considérer une machine synchrone à pôles saillants ayant une paire de pôles au rotor et un enroulement statorique triphasé. L'enroulement inducteur se trouve sur le rotor de la machine selon l'axe de la saillance, appelé axe direct ou axe longitudinal de la machine (ou encore axe polaire). La présence de grille ou de cage d'amortisseurs au rotor, ou encore l'éventuel effet d'amortisseur du fer, sont modélisés par deux circuits amortisseurs équivalents ; l'un sur l'axe polaire et l'autre sur l'axe inter polaire. [32] Le stator à induit triphasé fixe, séparé de l'entrefer par une surface cylindrique, est muni d'un enroulement triphasé a, b, c, qui correspond à un enroulement classique à champ tournant. La position de l'inducteur est donnée par l'angle que

fait Od avec chaque axe Oa , Ob et Oc (Fig. II.3), ce qui est exprimé par la relation suivante : [20]

$$\theta_a = \theta, \quad \theta_b = \theta - \frac{2\pi}{3}, \quad \theta_c = \theta - \frac{2\pi}{3}, \quad \omega_r = \frac{d\theta}{dt}$$

Où ω_r et la vitesse de rotation de l'inducteur

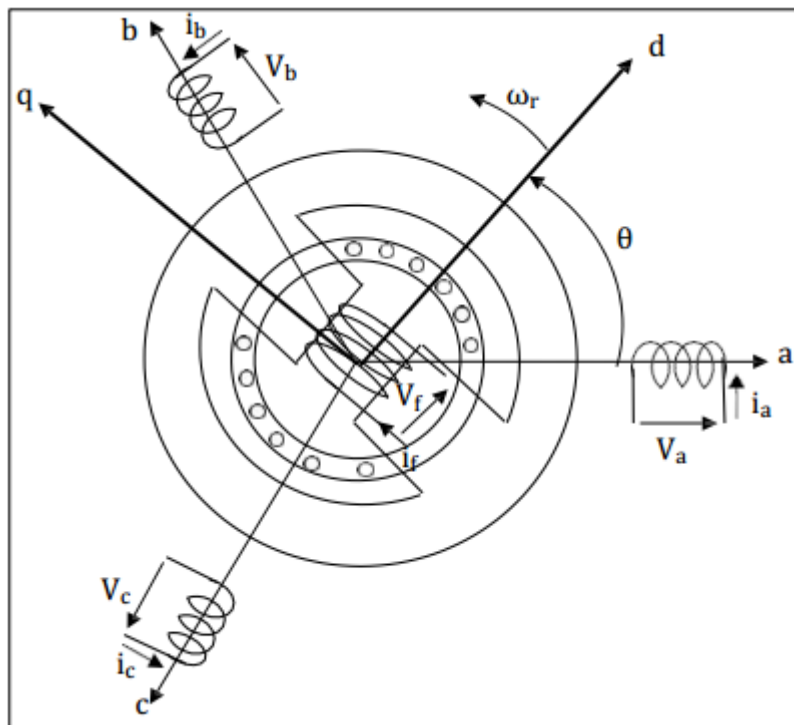


Fig. II.3 Machine synchrone triphasé avec amortisseurs

II.2.3 Hypothèses simplificatrices :

Le modèle retenu repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes [32] [20] :

- La perméabilité de la machine est constante, ceci suppose que le circuit magnétique est parfaitement linéaire ; la saturation magnétique est négligée. Cette hypothèse permet d'assumer que les inductances sont constantes. Les flux sont donc des applications linéaires simples des courants.
- La densité de courant dans les sections des conducteurs élémentaires est considérée comme uniforme, absence d'effet pelliculaire.
- La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale, cette hypothèse peut s'exprimer de la façon suivante : on ne considère que le premier harmonique d'espace de la distribution des forces magnétomotrices (f.m.m) créée par chaque phase de l'induit.

- La température de fonctionnement est constante, on néglige la variation des résistances des enroulements on fonction de la température. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- Les amortisseurs sont représentés par deux enroulements, en court-circuit sur eux-mêmes.

II.2.4 Equations électriques et magnétiques :

Les six enroulements de la figure II.4 sont décrits par les équations suivantes (convention récepteur électrique) [32] [20]

$$\text{Induit (stator)} \begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_a i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_a i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{Inducteur (rotor)} \begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec :

R_a : Résistance d'une phase statorique

R_{fDQ} : Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe Q

ϕ_{abc} : Les flux totaux à travers les bobines statorique

V_{abc} : Les tentions des phases statoriques.

Les tensions appliquées aux circuits D et Q sont nulles puisqu'ils sont en court-circuit.

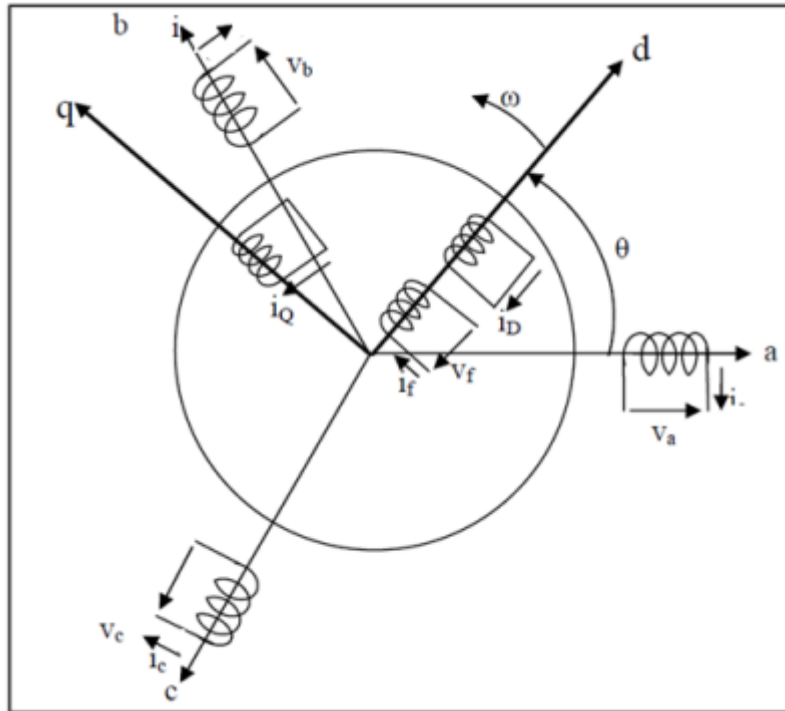


Fig. II.4 Machine synchrone triphasé, amortisseurs assimilés à deux enroulements en court-circuit, à 90° l'un de l'autre.

Les flux sont liés aux courants par les relations suivantes, exprimées sous forme matricielle.

$$\begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & L_D & M_{DQ} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & M_{fQ} & M_{DQ} & M_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Avec :

$L_a = L_b = L_c = \text{Constante}$, sont les inductances propres statorique.

$M_{ab} = M_{ba} = \text{Constante}$, sont les mutuelles entre phases statorique.

En ce qui concerne le rotor, les inductances propres rotoriques sont constantes (L_D, L_f, l_Q).

L'inductance mutuelle relative aux enroulements rotoriques de l'axe direct est $M_{fD} = \text{cte}$

Puisque les axes d et Q sont en quadrature, $M_{QD} = M_{DQ} = M_{fQ} = 0$. Les inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques sont fonction de l'angle électrique θ .

Dans la matrice (2.4), un certain nombre de coefficients sont fonction de l'angle θ , ce qui complique considérablement l'étude des régimes transitoires. Pour remédier à ce problème, on opère sur l'ensemble des grandeurs (tensions, courants, flux) un changement de base qui simplifie notablement les relations. Ce changement de variables, appelé « transformation de Park », est suggéré par les symétries du circuit magnétique par rapport aux axes d et q [32]

II.2.5 Transformation de Park :

La transformation de Park implique la transformation des enroulements des phases a , b , c , de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes d et q . Cette transformation a pour effet de rendre, les inductances mutuelles du modèle de la machine, indépendantes de la rotation. Dans la transformation de Park on définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux, à savoir : [32] [20]

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

On a ainsi :

$$[i_{dq0}] = [T][i_{abc}] \quad (2.6)$$

$$[V_{dq0}] = [T][V_{abc}] \quad (2.7)$$

$$[\phi_{dq0}] = [T][\phi_{abc}] \quad (2.8)$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ correspond à un changement naturel de bases dans des repères orthonormés. Changement qui, lorsqu'il est appliqué au vecteur courant et au vecteur tension, conserve la valeur de la puissance (le produit scalaire est indépendant de la base choisie)

Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation directe.

Avec la transformation de Park, la représentation schématique de la figure II.5 devient : [16] [20]

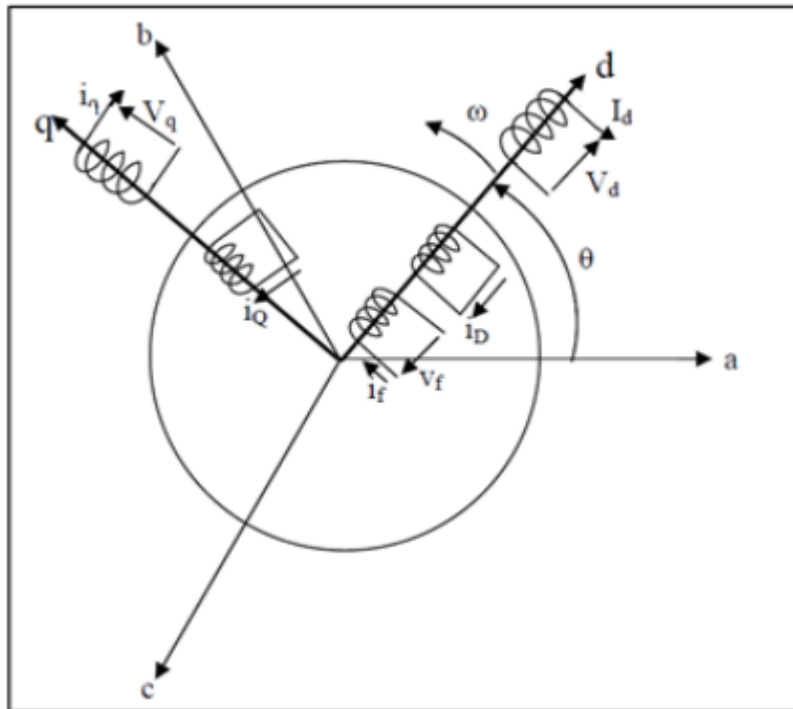


Fig. II.5 Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone

II.2.6 Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor :

Nous appliquons les changements de variables définis par la matrice T (équation 2.5) aux équations (2.9 et 2.10), alors :

$$V_{dq0} = [T]V_{abc} = [T][R_a]i_{abc} + [T]\frac{d\phi_{abc}}{dt} \quad (2.9)$$

En utilisant les transformations inverses on aura :

$$V_{dq0} = [T][R_a][T]^{-1}i_{dq0} + [T][T]^{-1}\frac{d\phi_{dq0}}{dt} + [T]\frac{d[T]^{-1}}{dt} \quad (2.10)$$

$$[T][t]^{-1} = 1 \quad (2.11)$$

On trouve

$$[T] \frac{d[T]^{-1}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En développant l'équation (2.12) on aura :

$$\text{Rotor} \quad \begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{cases} \quad (2.13)$$

Ces équations sont appelées les équations de Park : les équations de tensions pour d, q et 0 (la composante homopolaire), l'inducteur f, et les deux amortisseurs D et Q.

II.2.7 Equations des flux et courants :

En appliquant la transformation de Park aux équations (2.8), la matrice d'inductance est obtenue en reliant le vecteur des flux au vecteur des courants. Pour cela, les matrices $[T]$ et $[T]^{-1}$ sont complétées à l'ordre 6 par adjonction de trois lignes et colonnes correspondant à la transformation identique puisque les courants, flux et tensions d'indices f , D et Q ne sont pas affectés par la transformation de Park. Après calculs, on obtient : [32] [20]

$$\begin{pmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_0 \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af} & M_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{aq} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{af} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{ad} & 0 & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & M_{aq} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Avec :

L_d : Inductance synchrone longitudinale

L_q : Inductance synchrone transversale

L_0 : Inductance homopolaire

L_f : Inductance propre de l'inducteur

L_D : Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct

L_Q : Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature

M_{fD} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct

M_{af} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit

M_{aD} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe direct et l'induit

M_{aQ} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe en quadrature et l'induit

L'inductance synchrone L_d est composée de l'inductance propre cyclique statorique (L_{std}) et l'inductance de fuite globale (l_{st})

$$L_d = L_{std} + l_{st}$$

De la même façon, l'inductance synchrone transversale est composée de l'inductance propre cyclique rotorique (L_{stq}) et l'inductance de fuite globale (l_{st})

$$L_q = L_{stq} + l_{st}$$

Si la machine est à entrefer constant, alors : $L_d = L_q$

II.2.8 Schéma équivalent de la machine synchrone :

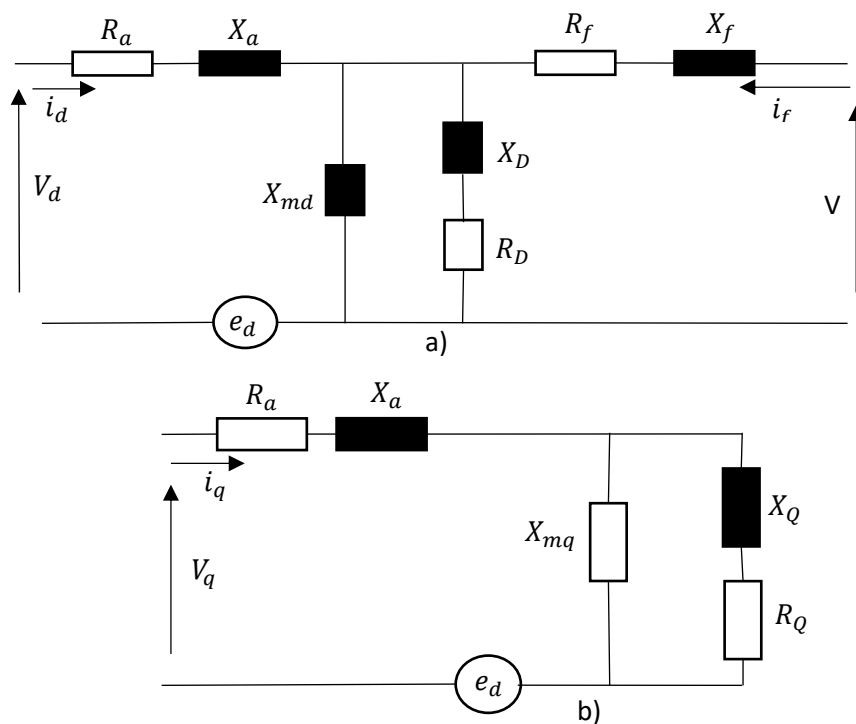


Fig. II.6 Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone (a) axe direct, (b) axe quadrature

II.3 Principe de la production de forces électromotrices triphasées équilibrées :

Décalées entre elles de 120° et soumise au même champ tournant. A ces décalages correspondent des retards de phase de $\frac{2\pi}{3}$ et de $\frac{4\pi}{3}$ d'où

$$e_1(t) = e\sqrt{2} \cos(\omega t) \quad (2.15)$$

$$e_2(t) = e\sqrt{2} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.16)$$

$$e_3(t) = e\sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.17)$$

On choisit l'origine des phases horizontale et le sens direct dans le sens trigonométrique.

De plus, on ne constate que les 3 f.é.m. produites par le champ magnétique d'intensité constante forment un système triphasé équilibré [11]

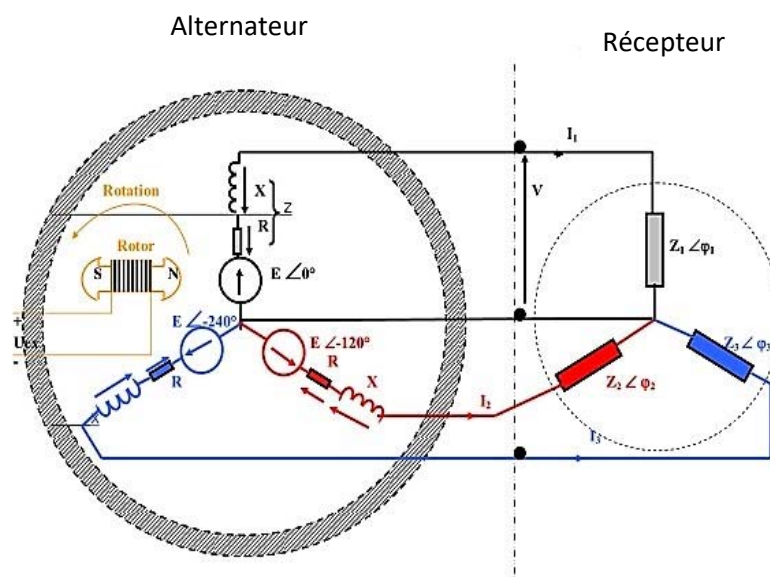


Fig. II.7 Schéma équivalent d'un alternateur triphasé [1]

II.3.1 Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur :

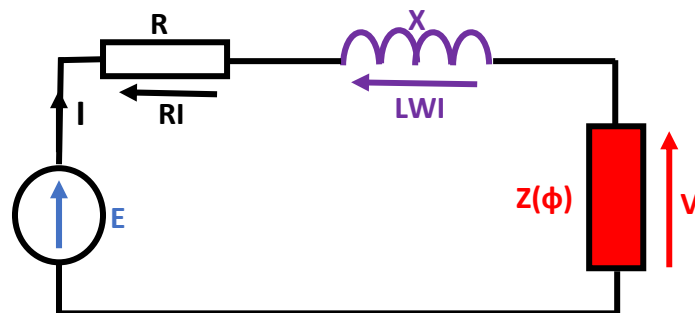


Fig. II.8 Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur

R = résistance d'une phase

$X = L\omega =$ réactance synchronique

$Z(\varphi)$ = impédance de la charge

$$\vec{E} = \vec{RI} + \vec{L\omega I} + \vec{V} \text{ OU } \underline{E} = \underline{V} + \underline{RI} + \underline{jL\omega I} \quad (2.18)$$

II.3.2 Diagramme des tensions et autre expression de la f.e.m

En général la résistance R est très faible devant $L\omega$; on n'en tient compte que dans le calcul du rendement :

$$\vec{E} = \vec{L\omega I} + \vec{V}$$

$$\underline{E} = \underline{L\omega I} + \underline{V} \text{ où}$$

$$E = jL\omega I + (V\cos\varphi + jV\sin\varphi) = j(L\omega I + V\sin(\varphi)) + V\cos\varphi$$

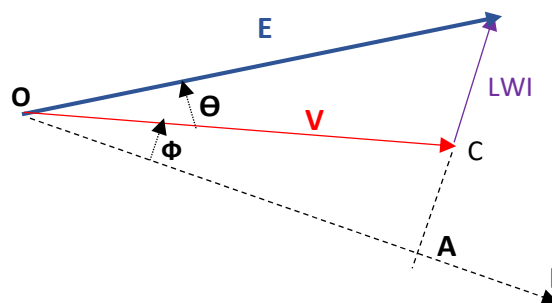


Fig. II.9 Diagramme des tensions

On peut aussi appliquer la relation ci – dessous en considérant le triangle rectangle

O A B rectangle en A :

$$OB^2 = OA^2 + AB^2 = OA^2 + (AC + CB)^2 \quad (2.19)$$

En remplaçant par leur valeur :

$$E^2 = (V \cos \varphi)^2 + (L\omega I + V \sin \varphi)^2 \quad (2.20)$$

En développant on obtient :

$$E^2 = V^2 + 2V \cdot L\omega I \cdot \sin(\varphi) + (L\omega I)^2 \quad (2.21)$$

II.3.3 Diagrammes de fonctionnement en charge :

Les paramètres de fonctionnement de l'alternateur sont :

- La vitesse N
- La tension V
- Le courant de charge I
- Le courant d'excitation I_{ex}
- Le facteur de puissance $\cos \varphi$

- **Charge résistive**

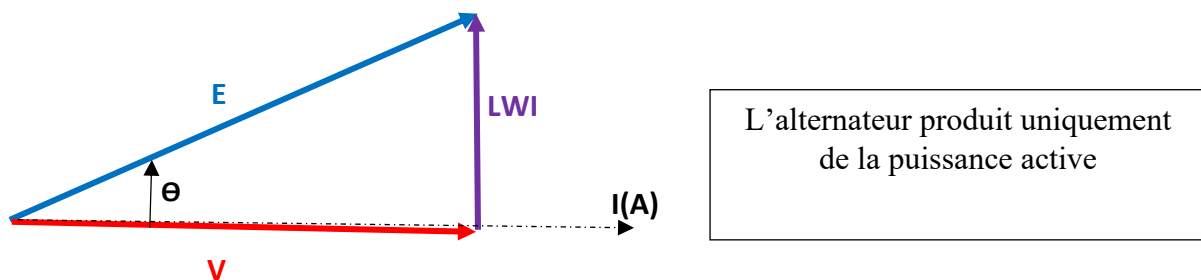
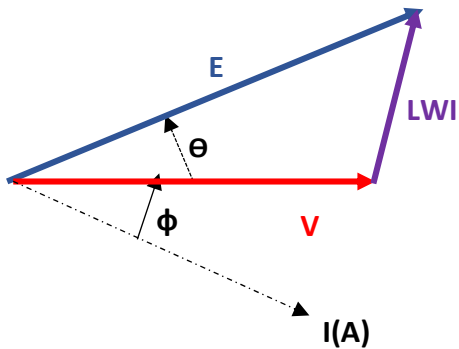


Fig. II.10 Diagramme de charge résistive

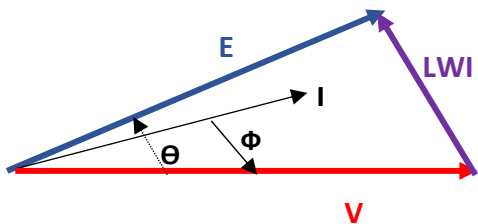
• **Charge inductive**



L'alternateur produit de la puissance active et de la puissance réactive
L'alternateur est surexcité

Fig. II.11 Diagramme de charge inductive

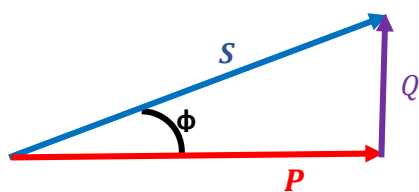
• **Charge capacitive :**



L'alternateur produit de la puissance active et absorbe de la puissance réactive
L'alternateur est sous excité

Fig. II.12 Diagramme de charge capacitive

Diagramme P Q



ALTERNATEUR TRIPHASE

$$P = S \cos \phi = \sqrt{3} UI \cos \phi$$

$$Q = S \sin \phi = \sqrt{3} UI \sin \phi$$

$$S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

$$\underline{S} = \underline{P} + j\underline{Q}$$

Fig. II.13 Diagramme PQ

II.4 Bilan des puissances de la machine synchrone :

Pour toute la partie bilan énergétique, il convient de ne pas oublier d'enlever le terme $U_E \cdot I_E$ dans le cas de machines à aimants permanents ou auto-excités.

On considère le cas de la machine fonctionnant en **alternateur**.

Pour entraîner l'alternateur une source extérieure fournit une puissance mécanique :

$$P_m = T_m \cdot \Omega \quad (2.22)$$

L'alimentation de l'excitation absorbe la puissance :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex} \quad (2.23)$$

Donc :

$$P_a = P_{ex} + P_m = U_{ex} \cdot I_{ex} + T_m \cdot \Omega \quad (2.24)$$

II.4.1 Puissance utile

Supposons que l'alternateur alimente une charge triphasée possédant un facteur de puissance $\cos(\varphi)$ et absorbant un courant d'intensité I le tout avec une tension entre phase U .

La puissance utile vaut : [15]

$$P_U = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos(\varphi) \quad (2.25)$$

II.4.2 Rendement de l'alternateur

1. Les différentes pertes de l'alternateur :

Les pertes dans toute machine électrique se traduisent toujours par un échauffement qui doit être limité si on ne veut pas détruire les matériaux constituant les différentes parties de la machine. [1] [10] [15]

Les différentes pertes d'un alternateur sont :

- Les pertes par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur,
- Les pertes par courant de Foucault,
- Les pertes par hystérésis,

- Les pertes par ventilation de l'alternateur,
- Les pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses paliers,
- Les pertes supplémentaires.

2. Pertes par effet joule :

Tout courant passant dans un fil conducteur provoque l'échauffement du conducteur. Les courants passant dans l'enroulement du stator et dans l'enroulement du rotor produiront donc un échauffement des conducteurs.

La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité (I) du courant qui circule dans le conducteur, à la résistance électrique (R) du conducteur au temps (t) de passage du courant dans le conducteur : [1] [10] [15]

La résistance d'un conducteur est proportionnelle à :

- Un coefficient ρ qui est une caractéristique du conducteur, ce coefficient croit quand la température du conducteur augmente.
- La longueur L du conducteur.
- L'inverse de la section S du conducteur. Ce qui peut s'écrire :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.26)$$

Energie transformée en chaleur :

$$RI^2 t \quad (2.27)$$

La puissance P correspondant à cette perte qui est égale à :

$$P = RI^2 \quad (2.28)$$

3. Pertes joule inducteur

L'inducteur est alimenté en courant continu ; la puissance perdue par effet joule dans le circuit d'excitation est : [1] [10] [15]

$$P_{ex} = R_{ex} I_{ex}^2 = U_{ex}^2 / R_{ex} \quad (2.29)$$

Prenons par exemple le rotor d'un alternateur de résistance $R = 0.80\Omega$. Si le courant d'excitation de l'alternateur est de 200 ampères, la puissance correspondant aux pertes par effet Joule dans le rotor sera :

$$P_{Jr} = 0.8 \times 200 \times 200 = 32\,000W \text{ ou } 32kW$$

4. Pertes joule induit

On pourrait faire un calcul analogue pour calculer les pertes par effet Joule dans chaque phase du stator en connaissant la résistance d'une phase et l'intensité du courant circulant dans chaque phase. Pour une phase de résistance r on aura : [1] [10] [15]

$$P_{JS} = ri^2 \quad (2.30)$$

Pour l'ensemble des trois phases :

$$P_{JS} = 3ri^2 \quad (2.31)$$

Si R est la résistance mesurée entre deux phases du stator :

$$P_{JS} = 1.5RI^2 \quad (2.32)$$

Il faut remarquer que les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant. Si, par exemple, le courant double dans les phases du stator les pertes par effet Joule dans le stator seront multipliées par 4. De même, si le courant d'excitation de l'alternateur double, les pertes par effet Joule dans le rotor seront multipliées par 4. [1] [10] [15]

5. Pertes par courants de Foucault

Les tôles du circuit magnétique du stator sont balayées par le champ tournant. Des forces Electromotrices sont engendrées à l'intérieur même des tôles; ces forces électromotrices font circuler des courants dans les tôles, ces courants sont appelés "courants de Foucault". Les courants de Foucault produisent un échauffement des tôles par effet Joule.

6. Pertes par hystérésis

Les tôles du circuit magnétique sont parcourues par un champ variable qui fait varier l'aimantation des tôles. Cette variation de l'aimantation provoque un échauffement supplémentaire des tôles. [1]

7. Pertes par ventilation de l'alternateur

Pour évacuer la chaleur produite par les pertes de l'alternateur on fait circuler un fluide gazeux (air ou hydrogène) dans les canaux de ventilation du rotor et du stator. La circulation du fluide est produite au moyen de deux ventilateurs calés sur l'arbre du rotor de part et d'autre des extrémités. Une certaine puissance est nécessaire pour vaincre toutes les forces de

frottement du fluide sur les parties métalliques et les enroulements qu'il rencontre sur son passage. On voit donc que l'énergie dépensée pour faire tourner les ventilateurs se transforme en chaleur. [1]

8. Pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses Paliers

La quantité de chaleur correspondant à ces pertes est évacuée par l'huile qui sert au graissage.

L'huile s'échauffe au passage dans les paliers, elle est refroidie dans un réfrigérant avant d'être envoyée à nouveau dans les paliers [1]

9. Pertes supplémentaires

Ces pertes correspondent aux courants produits par les forces électromotrices qui résultent d'une répartition inégale du champ magnétique particulièrement dans la profondeur des encoches du stator. Ces courants produisent un échauffement par effet Joule. Elles ne sont pas mesurables [1]

II.4.3 Représentation graphique des différentes pertes

Les pertes de puissance de l'alternateur se divisent en deux catégories : [1]

a. Les Pertes supplémentaires :

Elles ne sont pas mesurables ni calculables.

b. Les pertes dites mesurables :

Pertes fer, Pertes joules de l'induit, Pertes joules de l'inducteur et les Pertes mécaniques.

Les pertes fer et mécaniques sont indépendantes de la charge.

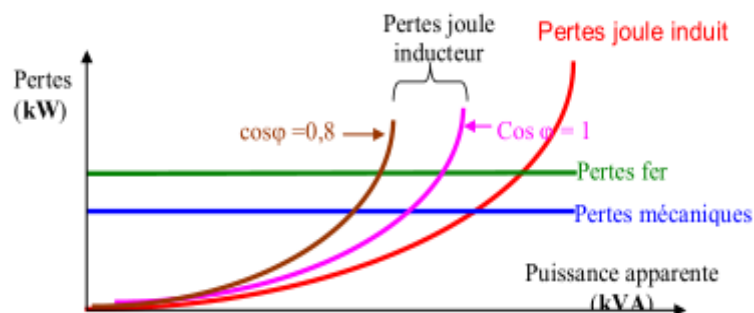


Fig. II.14 Courbe présente les pertes en fonction de puissance apparente

Les pertes joules de l'induit croissent avec la charge. Les pertes par excitation croissent avec la charge et dépendent du facteur de puissance (surexcitation ou sous excitation pour maintenir constante la tension aux bornes de la charge) [1]

II.4.4 Formules du rendement : [15] [1] [10] [14]

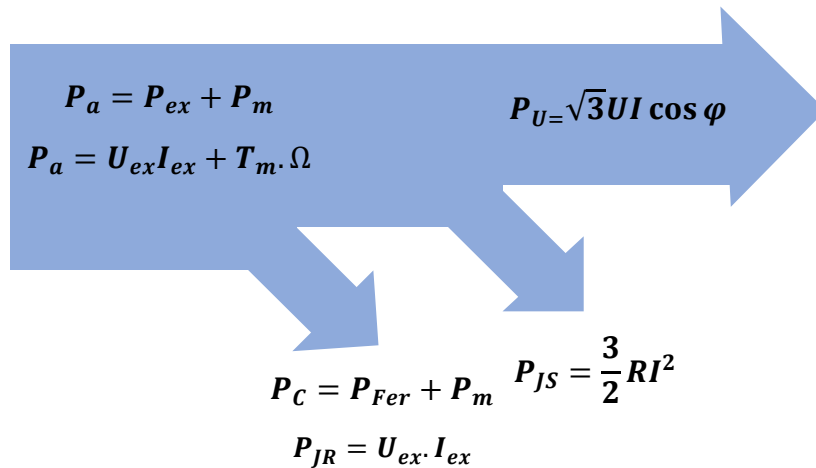


Fig. II.15 Diagramme qui présente toutes les pertes possibles

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}.U.I \cos(\varphi)}{\sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)+U_{ex}.I_{ex}+\frac{3}{2}.r.I^2+P_C} \tag{2.33}$$

II.5 Caractéristiques

II.5.1 Caractéristiques en charge

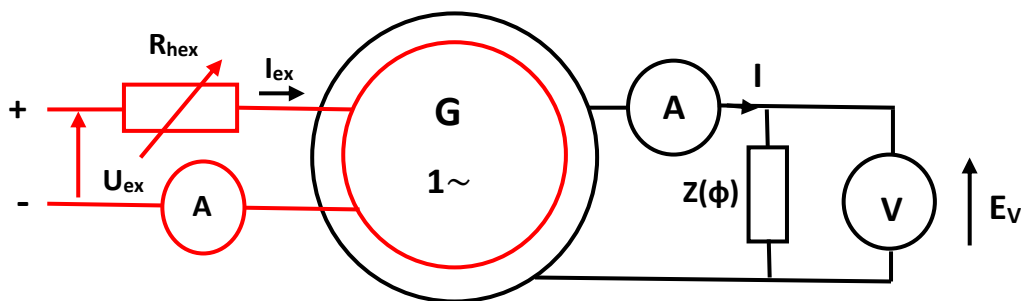


Fig. II.16 Schéma équivalent d'alternateur

Lorsque l'alternateur fonctionne, il y'a une chute de tension interne due à la résistance et à la réactance synchrone ; cette chute de tension est d'autant plus importante que le circuit

est inductif ; il peut y avoir une surtension aux bornes des récepteurs lorsque le circuit est trop capacitif (en cas de surcompensation par exemple).

Les courbes ci-dessous ont été tracées pour la même vitesse de rotation et pour un courant d'excitation constant afin de mettre en évidence la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté

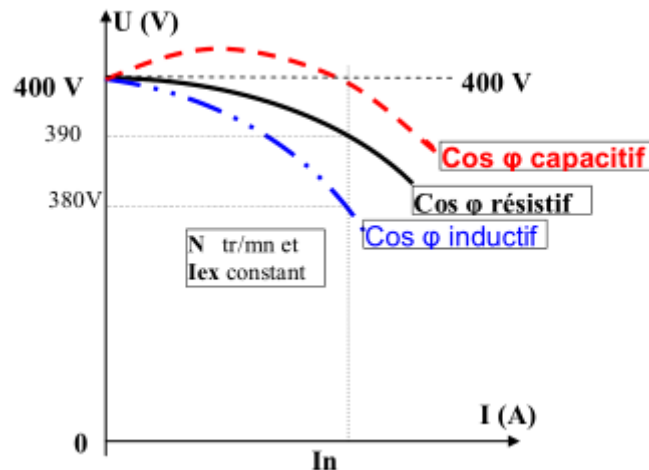


Fig. II.17 courbe qui présente la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté

NB : En pratique le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation pour maintenir la tension à peu près constante

1. Caractéristique externe :

Est la caractéristique en charge de l'alternateur, réalisée à l'aide d'une charge d'impédance variable mais $\cos(\varphi)$ constant. On obtient donc la courbe $v(i)$: [11]

- vitesse de rotation $n_s = cste$

- A courant d'excitation d'intensité $i_{ex} = cste$

- Avec une charge dont $\cos(\varphi) = cste$

La courbe C_1 = charge purement résistive

La courbe C_2 = charge résistive et inductive

→ La chute de tension est d'autant plus grande que la charge est inductive.

La courbe C_3 = charge résistive et capacitive

→ La chute de tension est d'autant plus petite que la charge est capacitive

Même si j et $\cos(\varphi)$ peuvent être choisis arbitrairement, la fréquence de rotation est imposée puisqu'elle conditionne la fréquence f des grandeurs électriques.

II.5.2 Caractéristique à vide

L'alternateur fonctionnant à vide (sans charge), on fait varier le courant d'excitation et on relève la **f.e.m.** correspondante

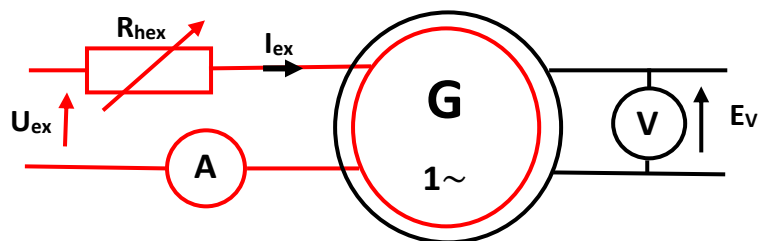


Fig. II.18 Schéma équivalent d'alternateur

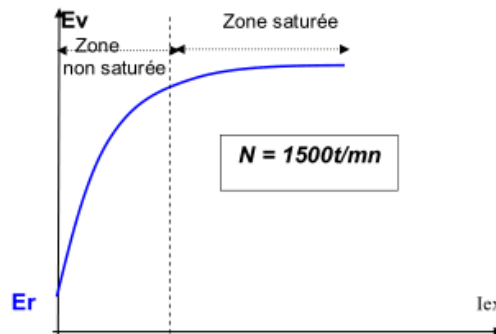


Fig. II.19 Courbe qui présente la tension de rotor en fonction de I_{ex}

E_r : tension de rotor; elle sert à l'amorçage de l'alternateur (voir excitation) La caractéristique est considérée comme une droite dans la partie non saturée ; autrement dit la f.e.m. est proportionnelle au courant d'excitation :

$$E_V = E_r + kI_{ex} \quad (2.34)$$

L'alternateur fonctionne normalement dans la zone non saturée [1]

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle simplifié de la machine synchrone par sa modélisation mathématique, avec l'emploi de la transformation de Park, pour passer d'une machine synchrone réelle triphasée à rotor tournant à une machine fictive biphasée équivalente à rotor fixe par rapport au stator.

Ensuite, nous avons présenté, le bilan des puissances et les caractéristiques de cette machine. Le chapitre suivant sera dédié à la régulation de tension d'alternateur de puissance ainsi qui sera validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulnk, en utilisant un modèle linéaire de l'alternateur obtenu par l'identification et cité dans plusieurs sources bibliographiques.

CHAPITRE III
REGULATION DE TENSION
ALTERNATEUR

Un système asservi se représente par une chaîne d'action de transmittance G et une chaîne de réaction de transmittance H , cette dernière réalise une réaction négative. Il y a ainsi une véritable séparation des rôles essentiels du système : la chaîne d'action fournit la puissance tandis que la chaîne de réaction effectue le contrôle et donne les ordres à la chaîne d'action. [12]

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir. [17] [18]

La régulation automatique est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la tension, la température, la pression, le niveau, le débit, le pH, la concentration, etc., en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinis.

L'objectif de notre travail est la régulation de tension de sortie V_{eff} par un régulateur proportionnel intégral dérivé (PID) en contrôlant le courant d'excitation i_f de l'alternateur.

III.1 Le Régulateur PID

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), un régulateur PID est un régulateur qui dispose de trois actions P, I et D. Son intérêt est de réunir les avantages des trois correcteurs de base. Grâce au terme P, la rapidité augmente et grâce à l'action I, la précision augmente (l'annulation de l'erreur statique) tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures. [18]

Les contrôleurs PID sont couramment utilisés pour améliorer les performances des systèmes AVR. En utilisant un contrôleur proportionnel, le temps de montée d'une réponse peut être réduit, mais l'état stationnaire de l'erreur ne peut pas être éliminée à zéro. Un contrôleur intégré peut améliorer la performance en régime permanent, mais il peut affecter sérieusement la réponse transitoire. Un contrôleur dérivé améliore la performance transitoire en réduisant le dépassement, améliorant ainsi la marge de stabilité pour le système. [22]

III.1.1 Loi de commande du régulateur PID : le régulateur Proportionnel intégral dérivé est donné comme suit :

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{k_i} \int e(t) dt + k_d \frac{de}{dt} \right) \quad (3.1)$$

III.1.2 Fonction de transfert du régulateur PID : la fonction de transfert du correcteur PID est donnée comme suit :

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \frac{1+k_i s+k_d k_i s^2}{s k_i} \quad (3.2)$$

III.1.3 Les actions PID

En pratique, à une catégorie donnée de systèmes à asservir correspond un type de correcteur adopté. Pour effectuer un choix judicieux, il faut connaître les effets des différentes actions : proportionnelle, intégrale et dérivée. [17]

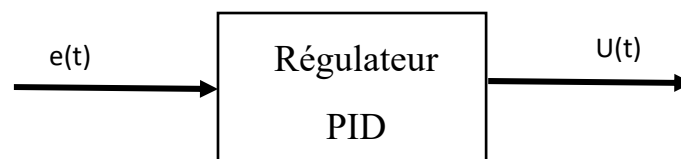


Fig.III.1 Schéma synoptique d'un régulateur PID

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes : [17]

- Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Un régulateur PID est la somme de trois termes :

➤ Le terme proportionnel $p = k_p e(t)$ (3.3)

➤ Le terme intégral $I = k_p \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t) dt$ (3.4)

➤ Le terme dérivatif $D = k_p k_d \frac{de(t)}{dt}$ (3.5)

Les paramètres du régulateur PID sont le gain proportionnel K_p , le temps intégral K_i et le temps dérivatif K_d , les temps étant exprimés en secondes.

Un tableau qui résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID :

Action	Points forts	Points faibles
P	Action instantanée	Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire
I	Annule l'erreur statique	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la rapidité Apporte un effet stabilisant	Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande

Tableau III.1 Résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
K_p	Diminue	Augmente	Augmente
K_i	Diminue	Augmente	Diminue
K_d	Augmente	Diminue	Augmente

Tableau III.2 Tableau d'influence

III.2 Régulation de tension d'alternateur

Les acteurs du système électrique, producteurs, transporteurs assurent avec la coordination de l'opérateur système, le fonctionnement du système en garantissant l'atteinte des objectifs cibles : la sûreté du système, la production et le transport de l'électricité au moindre Cout et la qualité de sa fourniture aux utilisateurs (tension, fréquence). Le système électrique est ajusté à des perturbations pouvant occasionner des conséquences lourdes sur le réseau tel que l'interruption partielle ou totale de l'alimentation qui peut avoir des impacts négatifs sur la vie de notre société. Les causes de ces perturbations peuvent être de natures diverses telles que : [19]

- ✓ Les fluctuations de consommation
- ✓ Les aléas météorologiques
- ✓ Les pannes et agressions extérieures

Pour faire face à ces perturbations, on doit prévoir des marges de sécurité nous permettant de contourner ces aléas ou de limiter leurs impacts. Une capacité de puissance réactive associée à une capacité de production de puissance active permettant de couvrir en permanence les besoins du système, assurent un maintien de la tension en tout point du réseau dans les plages de réglage fixées. [19]

III.2.1 Pourquoi règle-t-on la tension à certaines valeurs de référence ?

- Pour minimiser les pertes sur les lignes de transport
- S'éloigner des limites d'instabilité
- Respecter les tensions livrées à la clientèle pour le bon fonctionnement de leurs équipements
- Éviter de soumettre le matériel à des tensions trop hautes (tenue diélectrique évitant le vieillissement prématuré)
- Éviter de soumettre le matériel à des tensions très basses pouvant franchir le seuil conduisant à l'effondrement.

III.2.2 Les causes des variations possibles de tension :

- Perte de ligne électrique (la variation de l'impédance entraîne la variation de tension)
- Perte de groupe (variation de P et Q)
- Fluctuation de la consommation en période de forte consommation de la puissance réactive par les utilisateurs
- À puissance active consommée constante, toute chute de tension se traduit par une variation de l'énergie réactive

III.2.3 Moyens de réglages de la tension :

- Batterie de condensateurs à installer sur les jeux de barres des postes THT /HT et HT/MT ou chez les clients industriels : permettent la compensation des pertes et des consommations réactives
- Régleurs de transformateur de puissance
- Groupes de p
- roduction

Le réglage de la tension se fait par zone, à chaque zone sont affectés des groupes réglant, un point pilote (représentatif de la valeur de la tension et une plage de tension de consigne $U_c \text{min}$ - $U_c \text{max}$. Dans ce qui suit, nous allons étudier le système d'excitation d'alternateur des groupes de **RAS- DJINET** pour la régulation de tension de la zone du réseau à laquelle ils sont raccordés.

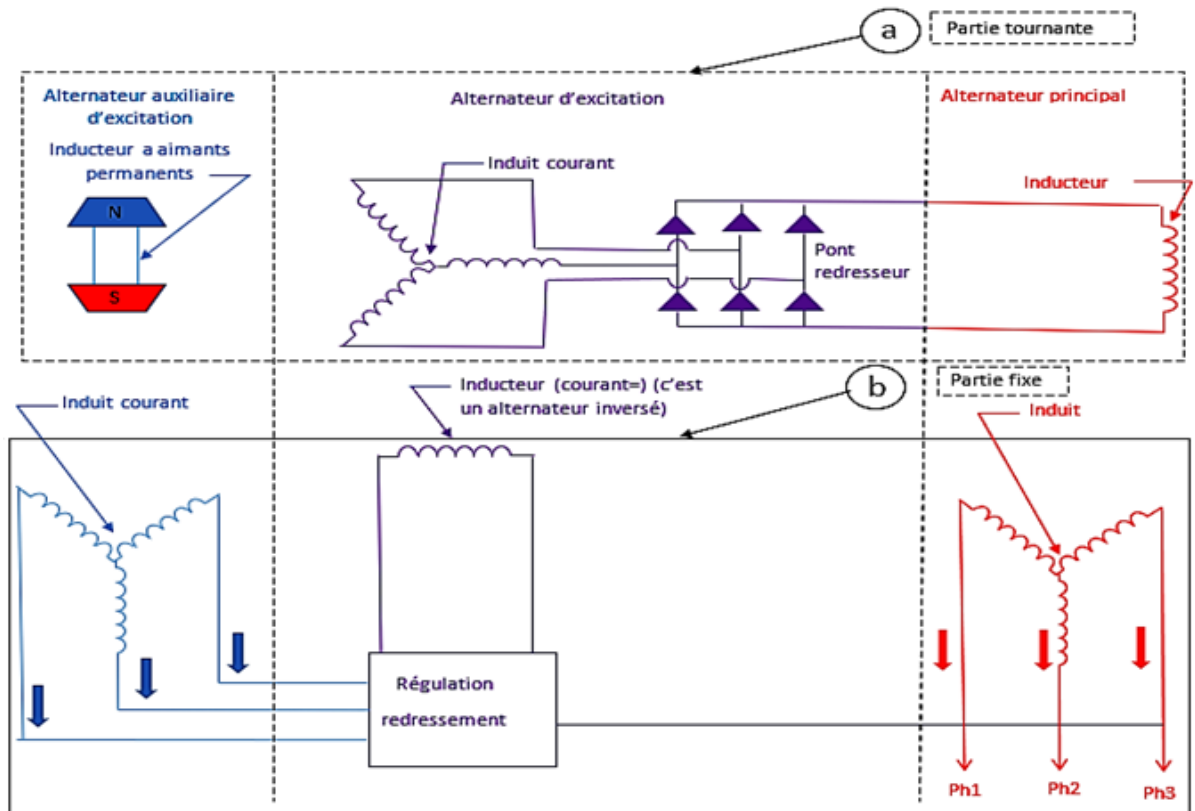


Fig III.2 Schéma Bloc du système d'excitation

Ce tableau représente les caractéristiques de l'alternateur :

Type de la machine	Alternateur	Excitatrice principale	Excitatrice pilote
Puissance	176MW	558KW	15KVA
Tension	15,5KV	240V	220V
Courant	8195A	2450A	41A
Vitesse	50 tr/s	50tr/s	50tr/s
Fréquence	50 Hz	50Hz	400Hz
COS θ	0.8	1
Courant d'induit	2450 A	41A	Aimant permanent

Tableau III.3 Caractéristiques de l'alternateur

III.2.4 Principe de réglage :

La régulation de tension est assurée grâce au régulateur multi canal avec une sécurité de fonctionnement particulière pour grands alternateur avec excitatrice à courant triphasé. Le dispositif de réglage possède trois circuits complètement séparés avec leur propre convertisseur pour : [19]

- ✓ Réglage de la tension
- ✓ Réglage du courant de champ
- ✓ Régime de secours avec transformateur de réglage

On peut commuter à la main ou automatiquement sans à-coup entre les modes de service réglage de la tension et réglage du courant de champ lorsque certaines conditions sont remplies. Les perturbations des régulateurs sont détectées et évaluées dans un appareil de surveillance. Les régulateurs sont entièrement électroniques et composés de cartes à circuit imprimé remplaçables et d'ensembles de pièces détachées enfichables. [19]

1) Régulation adaptée :

- ✓ Régulateur de tension
- ✓ Régulateur de courant de champ
- ✓ Régulateur à main

• Régulateur de tension :

Le régulateur est réalisé en tant que régulateur de tension avec régulateur de courant de roue polaire inséré et régulateur de courant de champ inséré. Il règle la tension aux bornes de l'alternateur. La tension de consigne est fournie par afficheur de consigne. La mise au point du potentiomètre de consigne peut se faire à la main sur place ou moyennant la commande à moteur à partir du poste de commande. La gamme de réglage se situe entre 85% et 115% de là l'alternateur. Le régulateur possède une chaîne de régulation à trois boucles fermées [19]

- ✓ Une boucle fermée de la régulation de tension d'alternateur U_a avec un régulateur à caractéristique P
- ✓ Une boucle fermée pour la régulation de courant de rotor (courant d'excitation) I_R avec régulateur à caractéristique P

- ✓ Une boucle fermée pour la régulation du courant de champ (courant inducteur de l'excitation principale) I_F avec un régulateur à caractéristique PI

Le régulateur possède un générateur d'impulsions (générateur de courant de gâchette) pour allumage des thyristors pour le réglage de la tension. Ce système de réglage se distingue par :

- ✓ Une grande stabilité et une vitesse de réglage dans tous les cas de charge
- ✓ Un statisme de puissance active et réactive Un accessoire de stabilisation de puissance active est raccordé au régulateur de tension pour amortir le groupe des machines en cas de condition de secteur critiques, c'est un dispositif électronique qui envoie des signaux additionnels au régulateur de tension afin que celui-ci tienne compte des variations de puissance active dues aux variations de tension d'excitation.

- **Régulateur de courant de champ :**

Il prend en charge le réglage de tension en cas de défaillance du circuit du régulateur de tension. Dans ce cas, la régulation de tension est opérée manuellement. Le régulateur de courant de champ se compose dans une large mesure des mêmes composants que le régulateur de tension. Lors d'une défaillance du régulateur de tension, l'installation commute automatiquement au régulateur de courant de champ, ceci étant rendu possible grâce à un réglage supplémentaire par poursuite et d'équilibrage (équilibrage non linéaire). Le régulateur par poursuite permet la commutation sans à-coups du régulateur de tension au régulateur de courant de champ. Ce dernier est tout le temps informé des données du régulateur de tension. Un dispositif d'équilibrage non linéaire à bande morte empêche un rajustement trop fréquent lors de l'écart des deux valeurs de consigne qui sont I_{FCA} et I_{FCM} .

- ✓ I_{FCA} : valeur de consigne du courant de champ lors du réglage automatique.
- ✓ I_{FCM} : valeur de consigne du courant de champ lors du réglage manuel.

- **Régulateur à main :**

Le régulateur à main utilisé en régime secours est constitué d'un transformateur de réglage télécommandé. Les qualités du transformateur intermédiaire permettent l'adaptation de la tension d'excitation maximale. Dans ce cas, le réglage de la tension se fait manuellement par variation du rapport de transformation du transformateur. [19]

Remarque :

Une commutation entre le régulateur à main et le régulateur à thyristors pendant le service n'est pas possible.

2) Mesure des grandeurs rapportées aux régulateurs :

Pour la marche, la mise au point et le contrôle du régulateur, il est important en chaque instant à ce dernier d'acquiescer certaines grandeurs de l'alternateur, à savoir :

- ✓ Le courant d'alternateur I_A
- ✓ La tension d'alternateur U_A
- ✓ Le courant de roue polaire I_R
- ✓ Le courant de circuit de champ I_e
- ✓ L'angle de déphasage interne δ

Toutes les valeurs, mis à part le courant de roue polaire peut être mesuré directement par le transformateur de courant et de tension. La mesure de ses grandeurs d'alternateur est faite en chaque instant et rapportés analogiquement au régulateur de tension. Nous développons après chaque détection et son rapport au régulateur.

• Mesure du courant d'alternateur I_A :

Moyennant un transformateur d'intensité, le courant d'alternateur est envoyé sur un potentiomètre pour la mise au point de la tension effective du courant, il est obtenu ainsi une mesure analogique du courant allant de 0 à 5 V.

Cette détection de I_A est envoyée au circuit de limitation et à l'élaboration de l'angle interne.

• Mesure du courant de champ I_e :

Elle se fait moyennant trois transformateurs de courant d'alternateur pour ramener le courant triphasé du convertisseur à thyristors (provenant de l'excitatrice pilote). Cette mesure à l'amont du pont de redresseur, nous permet contrairement à la mesure directe dans le circuit d'excitation une séparation galvanique afin de manipuler des courants faibles, libres de potentiel (pour les cartes électroniques). Il faut signaler qu'il Ya deux détections de courant I_e propre aux deux convertisseurs à thyristors. Le courant I_e est envoyé à un potentiomètre pour la mise au point de la tension effective du courant, il est obtenu ainsi une mesure analogique du courant allant de 0 à 10 V. L'alimentation du circuit de champ par des tensions de fréquence 400HZ permettra un très bon lissage de la tension d'excitation ainsi que le courant I_e

- **Mesure du courant de roue polaire I_R :**

Celle –ci est opérée en deux fois :

En premier lieu, elle est opérée par une simulation directe du courant de champ et rapportée au régulateur de I_R (inséré dans le régulateur de courant) et en second lieu par une mesure d'un champ transversal placé dans le stator de l'excitatrice principale. [19]

- **Simulation de I_R rapportée au régulateur :**

L'une des deux mesures du courant de champ I_F en amont des ponts redresseurs servira à la simulation de I_R dans une carte électronique.

Nous pouvons d'abord admettre la proportionnalité qui existe entre U_R et I_F à savoir que

$$U_R = K \cdot I_F$$

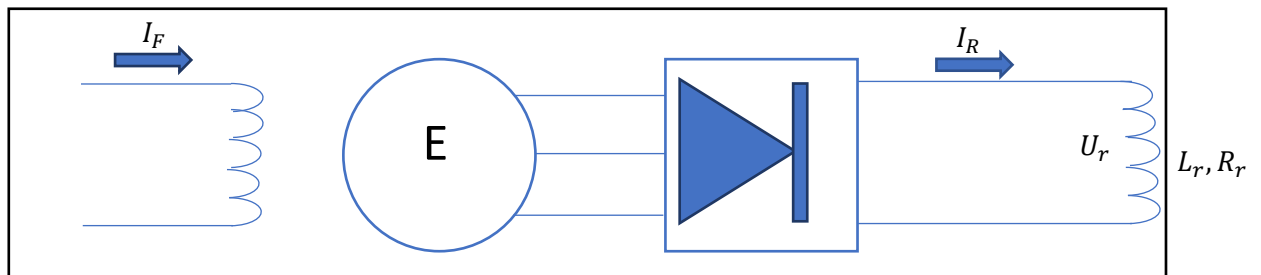


Fig III.3 schéma équivalent de partie inducteur (rotor)

$$U_r = R_r I_r + L_r \frac{dI_r}{dt} = (R_r + L_r p) I_r \stackrel{TL}{\Rightarrow} I_r = \frac{1}{R_r + L_r p} U_r \quad (3.6)$$

$$I_R = \frac{\frac{1}{R_r}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right)p + 1} U_R = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \left(\frac{L_r}{R_r}\right)p} K I_F \quad (3.7)$$

$$I_R = \frac{\frac{k}{R_r}}{1 + \left(\frac{L_r}{R_r}\right)p} I_F = \frac{k'}{1 + T_p} \quad \text{avec } k' = \frac{k}{R_r} \quad (3.8)$$

U_R : tension rotorique de l'alternateur

L_r : inductance rotorique

R_r : résistance rotorique

- **Mesure de l'angle de déphasage interne δ :**

Cette détection de l'angle interne se fait moyennant un trigger réagissant sur le front montant d'un signal élaboré par \vec{E} et \vec{U}_1

E : f.é.m. interne

V_1 : tension de sortie de
l'alternateur

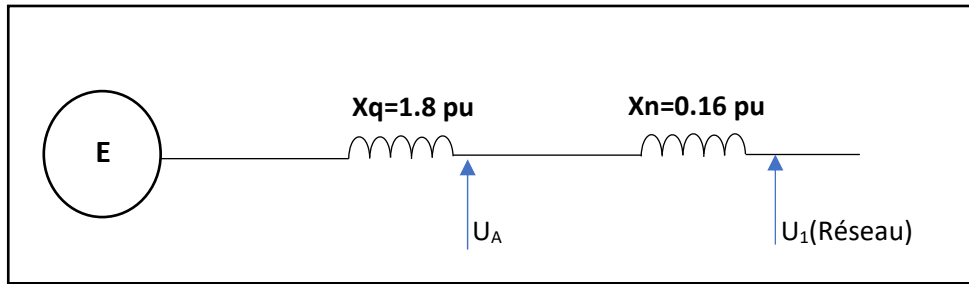


Fig III.4 schéma équivalent de l'induit (stator)

$$\vec{E} = \vec{U}_A + X_q \vec{I}_A \quad (3.9)$$

$$\vec{U}_A = \vec{U}_1 + X_n \vec{I}_A \quad (3.10)$$

$$\delta = (\vec{E}, \vec{V}) = (\vec{U}_A + X_q \cdot \vec{I}_A, \vec{U}_1 + X_n \cdot \vec{I}_A) \quad (3.11)$$

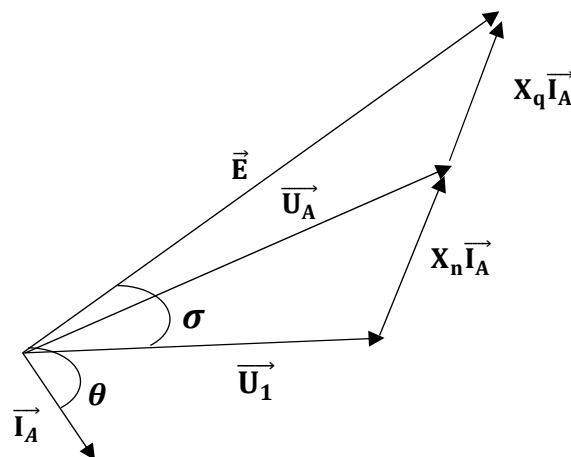


Fig.III.5 diagramme de BEHN ESCHENBURG

X_q : Réactance de l'alternateur

X_n : Réactance de l'enroulement à la sortie

δ : Angle interne

θ : Angle de déphasage entre U et I

III.3 Détails du modèle du système

La variation de l'amplitude de la tension du système dépend de la réactance de la machine pendant la durée de la variation décidée par la constante de temps du générateur. Étant un appareil statique, l'AVR offre un délai minimum et apporte la tension du système à sa valeur nominale rapidement. La tension aux bornes du système est détectée par l'AVR et maintenue à sa valeur nominale par réguler l'excitation. Les composants de base d'un AVR sont : le capteur, l'amplificateur, l'excitation et le générateur.

Le modèle de fonction de transfert complet d'un système AVR (sans régulateur) est représenté sur la figure III.6. Les valeurs de gains, les constantes de temps et la fonction de transfert de différents composants de l'AVR utilisés dans notre travail sont décrits dans le Tableau. [21] [22] [23] [24] [28] [29] [30]

III.3.1 Fonction de transfert de l'amplificateur :

La fonction de transfert d'un amplificateur est modélisée par un gain de K_a et une constante de temps T_a donnée par : [21] [22] [23] [24]

$$FT_a = \frac{K_a}{1+sT_a} \quad (3.12)$$

III.3.2 Fonction de transfert de l'excitation :

La fonction de transfert d'un exciteur modélisé par un gain de K_e et une constante de temps T_e est donné par : [21] [22] [23] [24]

$$FT_e = \frac{K_e}{1+sT_e} \quad (3.13)$$

III.3.3 Fonction de transfert du Générateur :

Un générateur modéliser par un gain de K_g et un constant de temps de T_g et fonction de transfert représenté par : [21] [22] [23] [24]

$$FT_g = \frac{K_g}{1+sT_g} \quad (3.14)$$

III.3.3 Fonction de transfert du capteur :

Le capteur peut être représenté par une fonction de transfert de premier ordre avec un gain de K_c et un constant de temps T_c est donné par : [21] [22] [23] [24]

$$TF_c = \frac{K_c}{1+sT_c} \quad (3.15)$$

III.4 Etude de la stabilité de système :

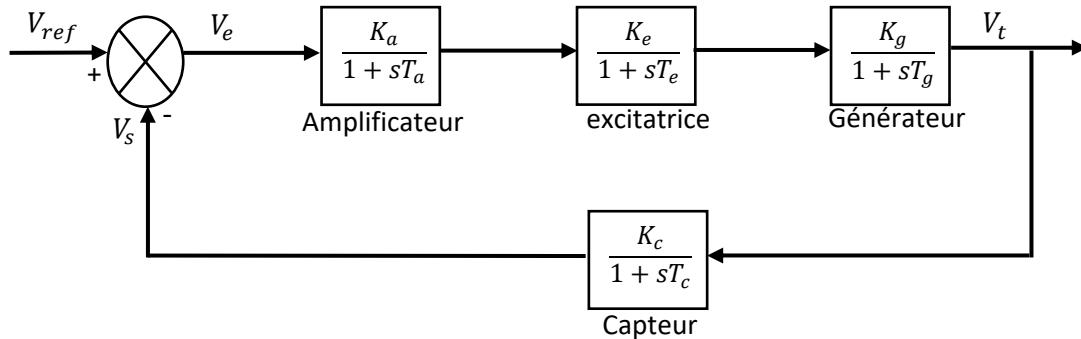


Fig. III.6 schéma bloc de système d'alternateur

Eléments	Fonction de transfert	Gain	Constants de temps
Amplificateur	$TF_a = \frac{K_a}{1+T_a}$	$K_a = 10$	$T_a = 0.1$
Excitatrice	$TF_e = \frac{K_e}{1+T_e}$	$K_e = 1$	$T_e = 0.4$
Générateur	$TF_g = \frac{K_g}{1+T_g}$	$K_g = 1$	$T_g = 1$
Capteur	$TF_c = \frac{K_c}{1+T_c}$	$K_c = 1$	$T_c = 0.01$

Tableau III.4 Paramètres utilisés pour le système de régulation automatique [25] [26] [27]

III.4.1 La fonction de transfert du système :

La fonction de transfert de notre système sans régulateur PID avec les paramètres donnés dans le tableau 4 est : [31] [21]

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{0.1s+10}{0.0004s^4+0.054s^3+0.555s^2+1.51s+11} \quad (3.16)$$

Les pôles de cette fonction de transfert sont :

$$P_1 = -99.9712$$

$$P_2 = -12.4892$$

$$P_3 = -0.5198 + 4.6642i$$

$$P_4 = -0.5198 + 4.6642i$$

Les quatre pôles sont à partie réelle négative alors notre system est stable.

III.5 Réponse indicielle du système sans régulation :

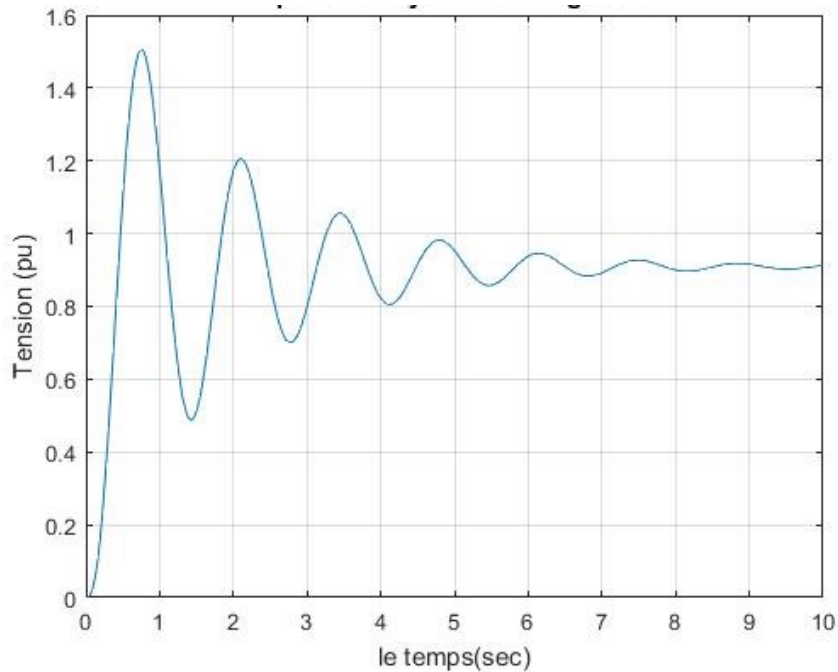


Fig.III.7 La reponse de système sans régulation

III.6 Etude du systeme avec regulation :

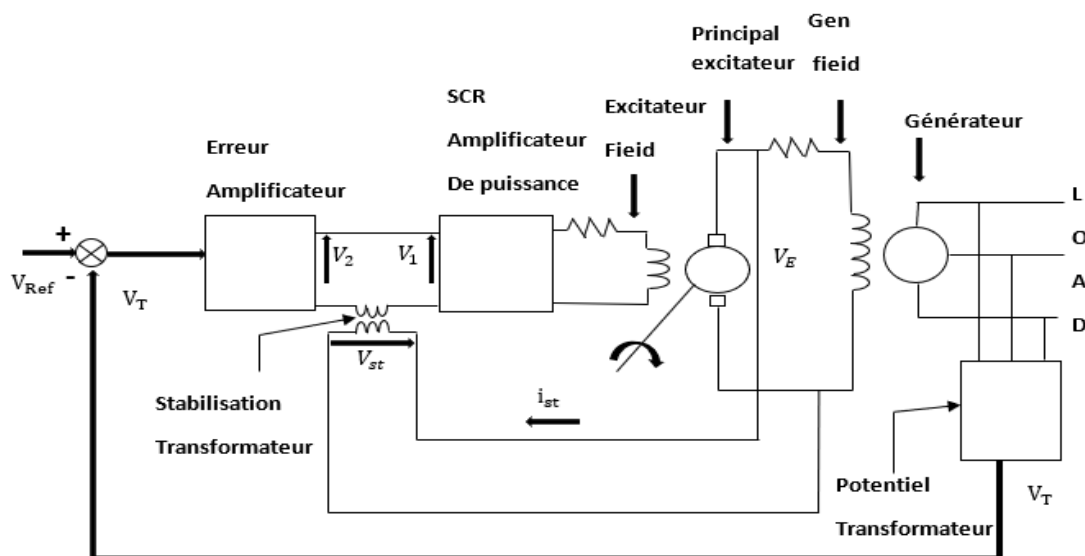


Fig.III.8 Diagramme de principe de regualtion de tension de l'alternateur

III.6.1 Régulation de tension à vide

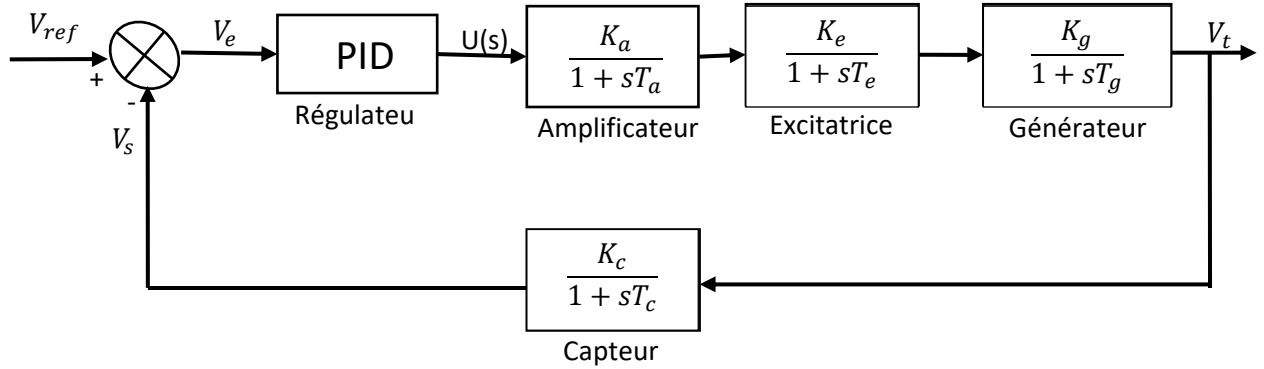


Fig.III.9 Schéma bloc de régulation de tension

Pour choisir les paramaitre du regulateur PID nous avons utilisé plusieurs valeurs pour K_p , K_i et K_d et on notes des fonctions objectifs OF_1, OF_2, OF_3 et OF_4 .

Paramètres	OF_1	OF_2	OF_3	OF_4
K_p	0.5878	0.6022	1.2930	0.6190
K_i	0.4062	0.3763	0.9828	0.4222
K_d	0.1843	0.1841	0.6303	0.2058

Tableau III.5 paramètres de régulateur PID avec plusieurs fonctions objectives

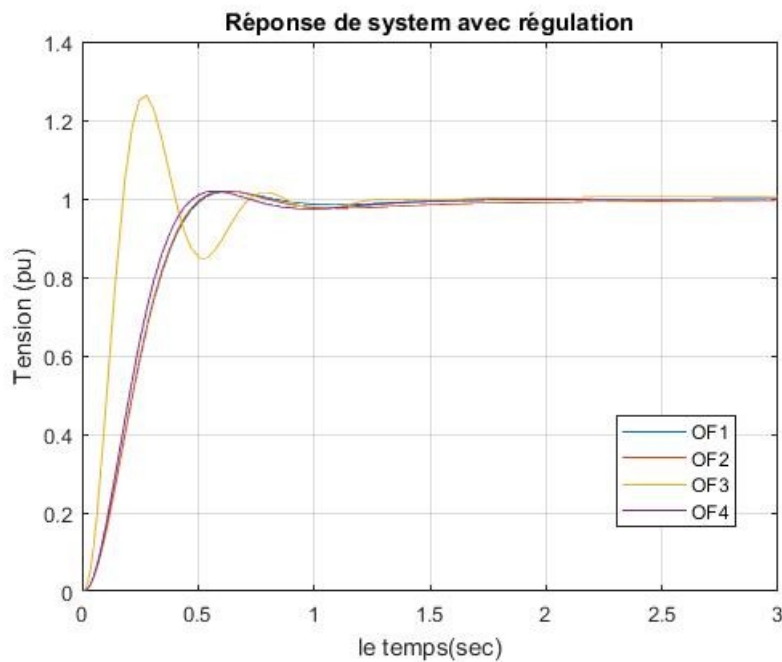


Fig.III.10 Réponse indicielle du système avec changement de K_p , K_i et K_d

III.6.2 Régulation de tension en charge

Le gain de générateur K_g et le constant de temp T_g dépends de la charge. K_g Varie entre 0.7 et 1 et T_g entre 1 et 2 sec, la variation est entre alternateur en charge et alternateur sans charge. [22]

Pour régler la tension de l'alternateur en charge il faut démarrer notre machine à vide, après certains temps nous plaçons une charge variable.

1. 1er cas

Pour $K_g=0.7$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

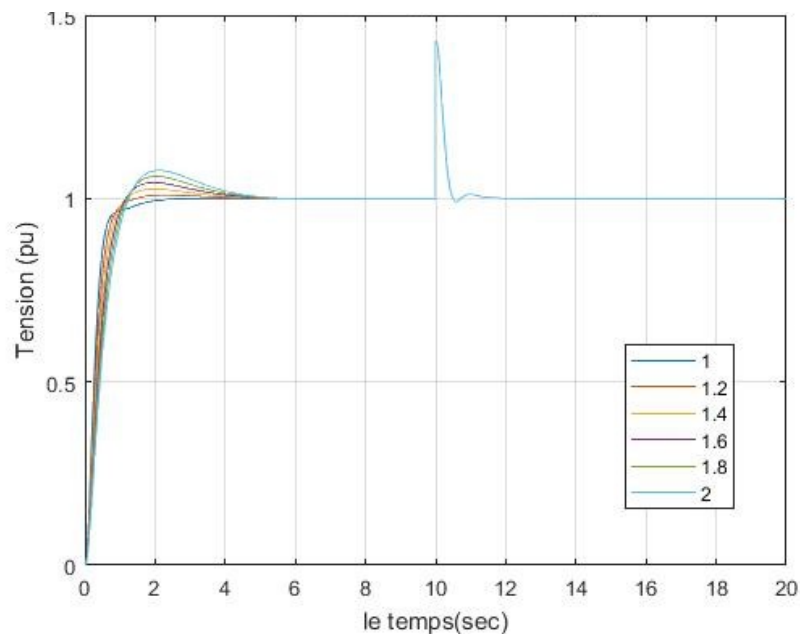


Fig.III.11 Réponse indicielle du système pour le 1er cas

La courbe présente la réponse du système en fonction de temps à une entrée échelon a amplitude égale à 1 pour $K_g=0.7$ après 10 sec, nous constatons que le pique de perturbation arrive à une valeur maximale de 1.45.

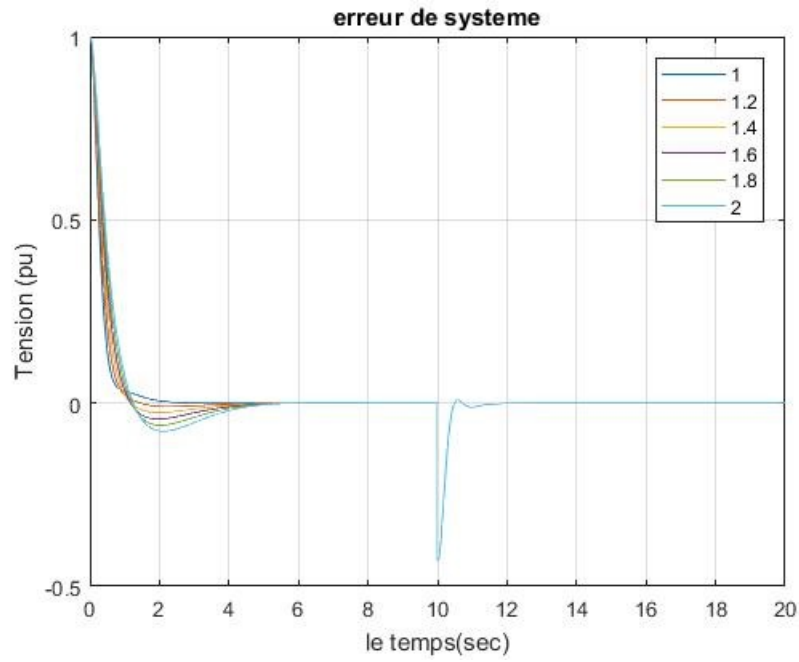


Fig.III.12 Erreur du système pour le 1er cas

L'erreur tend vers 0 avec une perturbation d'une valeur min de -0.45 à l'instant $t = 10\text{sec}$

2. 2eme cas

Pour $K_g=0.8$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

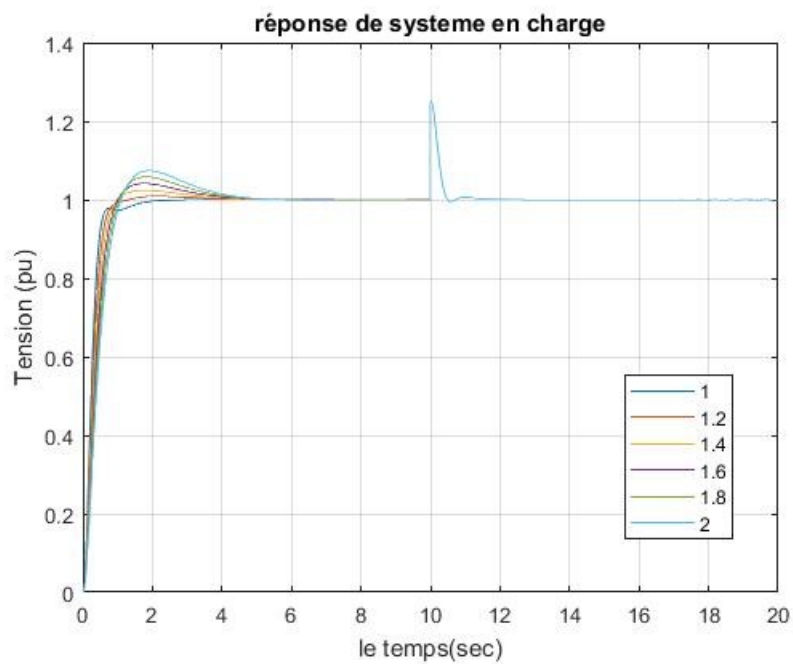


Fig.III.13 Réponse du système pour le 2eme cas

Nous avons fait la même chose que le 1er cas pour $K_g=0.8$, la même remarque sauf que la perturbation arrive à une valeur de 1.25.

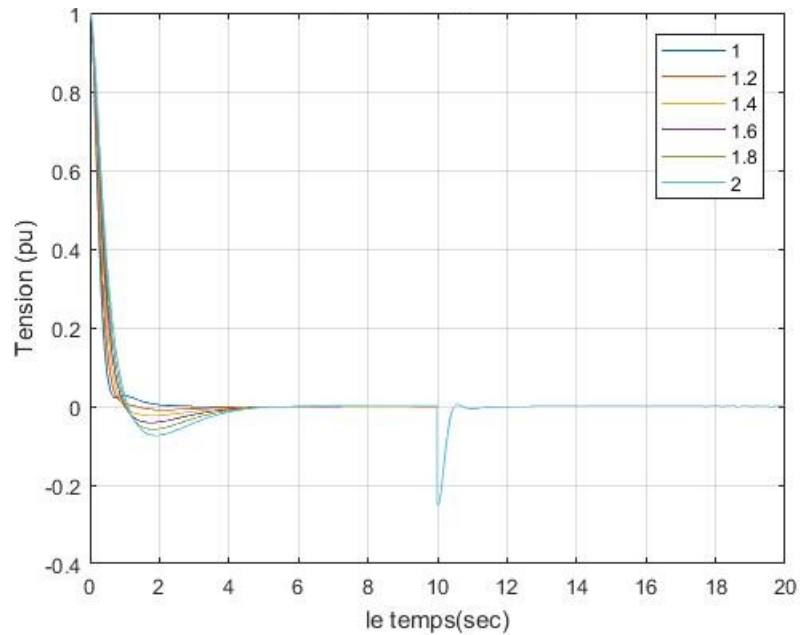


Fig.III.14 Erreur du système pour le 2ème cas

La même erreur que le 1er cas mais à une valeur de -0.25

3. 3eme cas

Pour $K_g=0.9$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

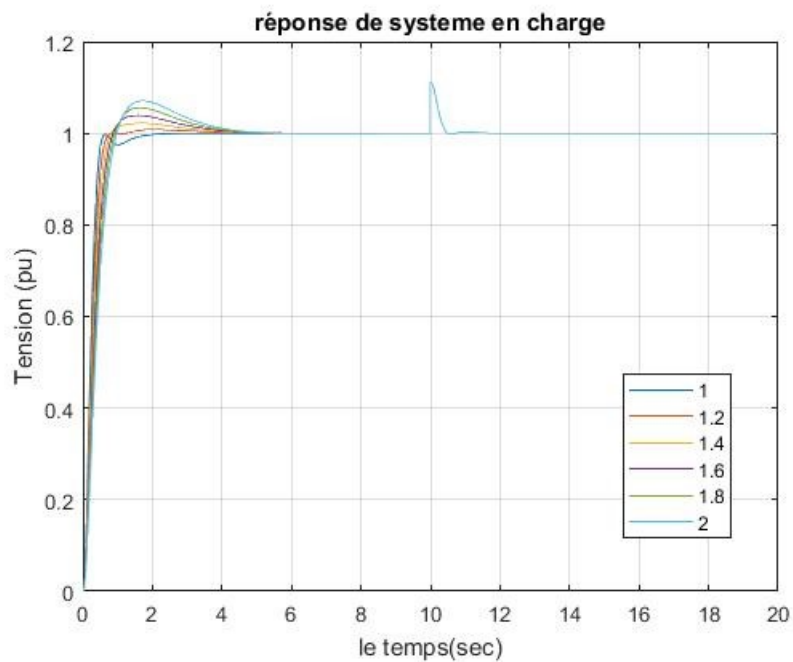


Fig.III.15 Réponse du système pour le 3ème cas

La même remarque mais la perturbation augmente à une valeur de 1.15.

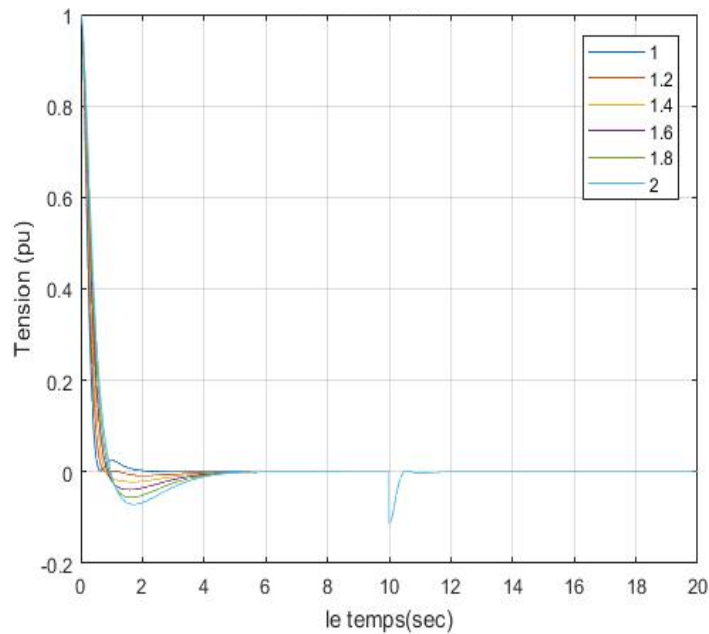


Fig.III.16 Erreur du système pour le 3ème cas

La même erreur avec une perturbation d'amplitude de -1.15.

4. 4eme cas

Pour $K_g=1$ avec toutes les valeurs possibles de T_g :

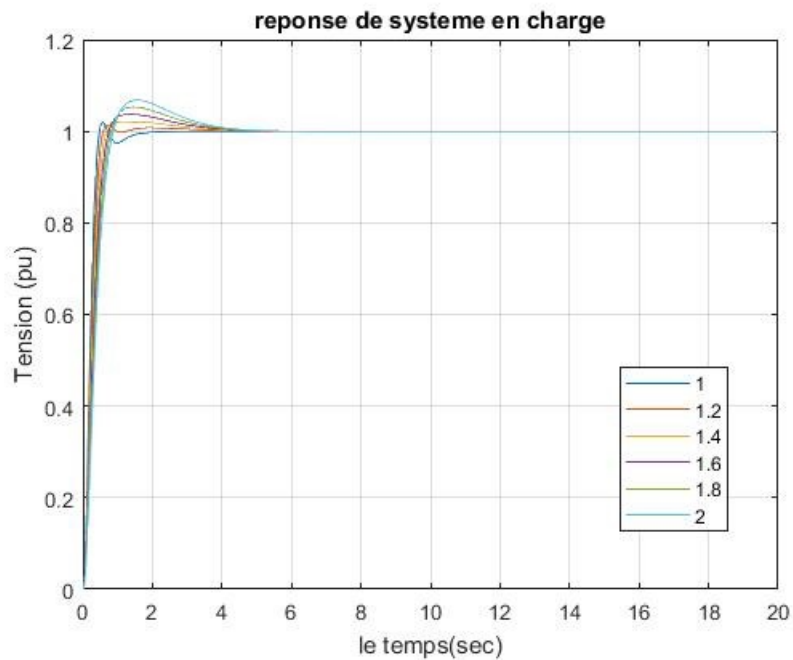


Fig.III.17 Réponse du système pour le 4ème cas

Dans ce cas on remarque qu'il n'y a aucune perturbation

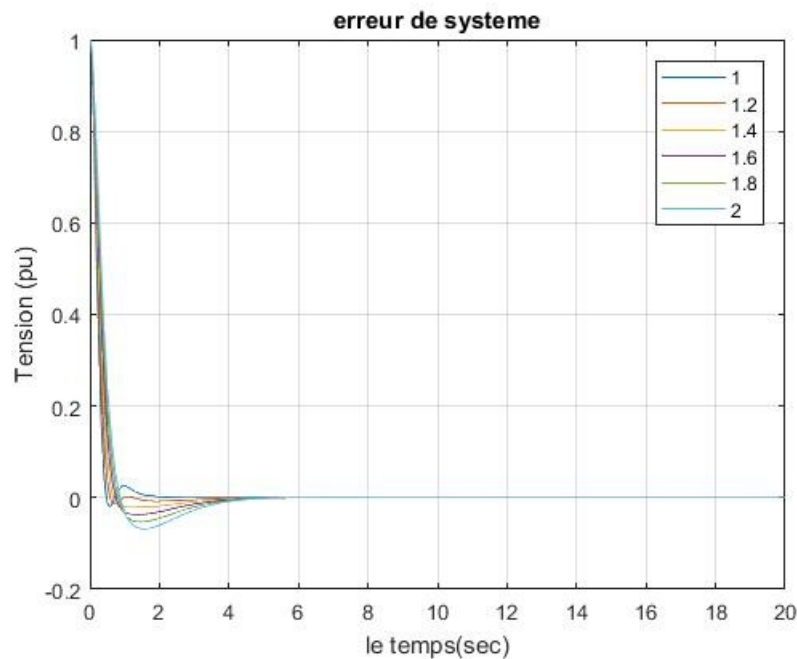


Fig.III.18 Erreur de système pour la 4^{ème} cas

Pas de perturbation donc l'erreur de 4^{ème} cas.

III.7 Résultats et discussion

D'après le tableau III.5 et la figure III.10 . Il ressort que lorsque OF_4 est choisi comme fonction objectif, la performance du système AVR contrôlé par PID améliore encore de dépassement minimal et temps de stabilisation minimum. Par conséquent, les paramètres du contrôleur obtenus en prenant OF_4 comme fonction objective est choisi pour une analyse plus approfondie.

Pour la regulation en charge nous avons placé une charge après un certain temps après le démarrage de notre alternateur de puissance par quatre cas de variation de cette charge, nous avons remarqué dans les reponses indicielle de tension qu'un pique de tension à l'instant du palcement de la charge, l'amplitude du pique diminu avec les changement de variable jusqu'à sa disparition pour le 4eme objectif.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et présenté la regulation de tension de sortie d'un alternateur de puissance et comme exemple nous avons pris la centrale thermique de Ras

Djanet d'Algerie. Nous avons utilisé un regulateur de type PID classique en vérifiant sur le courant d'excitation de l'alternateur.

Nous avons utilisé un modele lineaire de notre système, ce modele à été dans plusieurs reference de qualité, ce qui nous a permet d'avoir des resulats tres satisfaisant, ou la sortie a bien suivi la consigne.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le présent travail a pour but de faire la régulation de tension alternateur de puissance pour faire face aux effets de variation de la consommation de l'énergie électrique ainsi que les pertes dans les lignes et les incidents électriques dans le réseau et les installations électriques et le devoir des fournisseurs d'électricité d'assurer une fréquence fixe avec la tension exigée par les appareils des clients.

Au cours de ce mémoire, nous avons fait une présentation détaillée de la technologie, le fonctionnement et la modélisation de l'alternateur de puissance, nous avons fait la régulation de la tension de l'alternateur en simulation sous l'environnement Matlab/Simulink en utilisant une loi de commande de type proportionnelle intégrale dérivée (PID), une étude à vide et en charge et les résultats obtenus ont été très satisfaisant soit du côté stabilité soit du côté précision ainsi la rapidité.

A la fin de ce travail, nous espérons que notre étude sera une base pour traiter ce même sujet mais en utilisant d'autre approche pour régler la tension alternateur de puissance.

Bibliographies

Bibliographie

- [1] Bapio BAYALA, *la machine électrique*, Formation Continue – Techniciens Supérieurs – Ingénieurs Electrotechniciens La dernière modification de cette page a été faite le 11 avril 2018 à 09:58
- [2] Amari Mansour, *Cours d'électrotechnique*, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Janvier 2014
- [3] <https://youtube.be/4bexpbdcjo> le 06/02/2018 22h02 mn
- [4] Leroy-Somer, *Alternateurs – Alternators, LSA ; LSA M ; LSA C ; LSA K ; LSA T 50 / 51 AREP Installation et / and maintenance, 3281 en- 2017.12/O*
- [5] A. BLAJKINE, *Electrotechnique générale*, traduction français, Edition Mir 1977
- [6] https://www.emse.fr/~dutertre/documents/Cours_ET_1A_imp.pdf
- [7] Belkhira Sabrina Hadjer, *Etude et application des régulateurs automatiques AVR-PSS appliquée aux turbo alternateurs sous le régime des FACTS*, Mémoire de Fin d'Etudes, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017
- [8] Abdallah Mouhammad BARAKAT, *Contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones nouvelles structures d'excitation associées à des lois de commande H_{∞}* , THESE, Présentée à L'UNIVERSITE DE POITIERS, 18 novembre 2011
- [9] KHALED OURAMDANE, *Modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur analogique d'hydro-quebec*, Mémoire Présenté A L'école De Génie De L'université Du Québec En Abitibi Témiscamingue, MAI 2015
- [10] Claude CHEVASSU, *Machines Electriques. Cours et Problèmes*, O1MM 2e année, version n°2,71-05/02/2014
- [11] Christophe palermo, *L'alternateur Synchrone*, IUT de Montpellier (Mesure physiques) 2010/2011
- [12] Mcœcel MOUSTIER, *Etude et réalisation de l'excitation statique d'un groupe synchrone moteur-alternateur*, MEMOIRE présenté en vue d'obtenir LE DIPLOME D'INGENIEUR C. N. A. M. CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS PARIS, le 28 Juin 1978.
- [13] D. Jolevski, *Excitation System of Synchronous Generator*, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Arhitecture, plit, 2009.
- [14] Theodor Wildi, *Électrotechnique*, imprimé au Canada, sixième impresion-juiller, 1988

- [15] Nikola Tesla (1856-1943)., Electro Magnetic Motor Patent number n° 381,968, United States Patent Office, déposé le 12 octobre 1887, publié le 1er mai 1888.
- [16] E. MATAGNE, *Machines synchrones*, Université Catholique de Louvain-ELEC2753-2012.
- [17] SakliMOUADH, *Régulation Industrielle de Processus*, projet fin d'études, projet-automatisme-2007.
- [18] Kadri Ahmed Yacine, *Régulation Automatique*, cours, UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA ,2013/2014.
- [19] Mr BAOUALI BILAL et Mr CHIBANE AMIR, Etude du Système de Régulation Automatique de la Tension AVR+PSS des Alternateurs de Grande Puissance, Application : Alternateur 176 MW de la Centrale de Cap-Djanet, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Présenté En vue de l'obtention du diplôme de Master, Promotion Juin 2017
- [20] Lamya Abdeljalil, MODELISATION DYNAMIQUE ET COMMANDEDES ALTERNATEURS COUPL'ES DANS UNR'ESEAU 'ELECTRIQUE EMBARQUE, Thèse de Doctorat de à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes – Saint Nazaire, 29 Novembre 2006
- [21] Binod Kumar Sahu and Sidhartha Panda, Electric Power Components and Systems, Tuning and Assessment of Proportional–Integral–Derivative Controller for an Automatic Voltage Regulator System Employing Local Unimodal Sampling Algorithm, 30 May 2014,
- [22] Ismayil C, Sreerama Kumar R, and Sindhu T. K<<Automatic Generation Control of Single Area Thermal Power System with Fractional Order PID ($PI\lambda D \mu$) Controllers, Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, Kanpur, India, March 13-15, 2014
- [23] M.CengizTaplamacioğlu, *Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system*, Journal of the Franklin Institute 348 (2011) 1927–1946, Gazi University, Available online 19 May 2011
- [24] A. G.Suribabu and B.T.Chiranjeevi, *Implementation of Fractional order PID controller for an AVR System Using GA and ACO Optimisation Techniques*, IFAC-PapersOnLine 49-1 (2016) 456–461
- [25] Ziegler, J. G., and Nichols, N. B., *Optimum settings for automatic controllers*, Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759–768,1942.
- [26] Coelho, L. D. S., *Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach*, *Chaos, Solitons Fractals*, Vol. 39, pp. 1504–1514, 2009.

- [27] Mohanty, B., Panda, S., and Hota, P. K., *Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system*, Int. J. Elect. Power EnergySyst., Vol. 54, pp. 77–85, 2014
- [28] Gaing, Z. L., *A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system*, IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 19, pp. 384–391, 2004
- [29] Gozde, H., and Taplamacioglu, M. C., *Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system*, J. Franklin Inst, Vol. 348, pp. 1927–1946, 2011.
- [30] Panda, S., Sahu, B. K., and Mohanty, P. K., *Design and performance analysis of PID controller for automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization*, J. Franklin Inst., Vol. 349, pp. 2609–2625, 2012.
- [31] Mohanty, B., Panda, S., and Hota, P. K., *Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system*, Int. J. Elect. Power EnergySyst., Vol. 54, pp. 77–85, 2014.
- [32] BOUYAHIAOUI Oussama et KOUROUGHLI Mohamed Amin, *Etude et simulation du démarreur statique LS2100e de l'alternateur de grande puissance de la centrale de BOUFARIK*, Mémoire de fin d'études, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2015/2016.