



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique
Option : Machines

Thème

*Contrôle et protection des systèmes
d'excitation des machines synchrones*

DIRIGE PAR :

M^r K.HADJ-SAID

REALISE PAR :

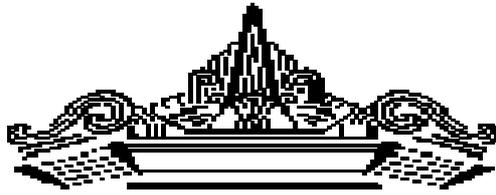
M^{lle} BELAMIRI Thamazgha

M^r ADJAZ Jugurtha

*Promotion
2009/2010*



Remerciements



Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail. ☺

Ce présent travail a été fait à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou sous la direction ☺ de M^r HADJ-SAID à qui nous tenons à exprimer notre extrême reconnaissance et le remercier vivement pour ses conseils qu'ils nous a prodigués tout au long de ce travail.

Nous remercions les examinateurs d'avoir si complaisamment accepté de participer à notre jury et ☺ pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail.

Nous tenons à remercier M^r ZAOUIA et M^r IMACHE de nous avoir apporté aide et soutien moral. ☺

Sans oublier nos respects les plus distingués à tous les ☺ enseignants qui ont contribué à notre formation durant ☺ notre cursus d'études.

Nous faillirons à la tradition si nous n'exprimons ☺ ici notre gratitude envers tous ceux qui ont ☺ collaboré à l'exécution de ce mémoire. ☺



A decorative graphic of a scroll with a light blue gradient and a dark blue border. The scroll is unrolled in the center, with the word "Dédicaces" written in a blue, cursive font. The scroll has a dark blue circular element at the top right and a dark blue rectangular element at the bottom left, suggesting it is being held or pinned.

Dédicaces



Dédicaces



En guise de reconnaissances et de respect je dédie ce modeste travail à :

Ma mère, que deviendrais-je sans vous ? Je ne serais pas là où j'en suis sans votre soutien. .

Des encouragements, sans cesse renouvelés, au moment les plus difficiles dans tout mon parcours, je te remercie pour ton interminable sacrifice et pour tes précieux encouragements.

A mes très chers grands parents (Mohammed et ourdia) en témoignage de leurs affections et leurs dévouements pour mon bonheur.

A mes oncles mouloud, madjid, malik et à leurs enfants .

A mes tantes nacira, bahia, sabiha, fatiha, radia et à leurs maris.

A tous mes amis belaid, aissam, mouloud, samy, meziane, myriam, aini, yamina, nawel et sonia .

A mon binôme et toute sa famille.



Jugurtha



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes d'excitation

Introduction	2
I-1-Définition d'un système d'excitation	2
I-2-Exemple d'un système d'excitation	2
I-3-Fonctions devant être assurées par le système d'excitation	3
I-4-Types des systèmes d'excitation	4
I-4-1-Excitation à courant continu (C.C).....	4
I-4-2-Excitation à courant alternatif (C.A).....	5
I-4-3-Sources statiques (Auto-alimentation)	8
I-4-3-1-Auto-alimentation à dérivation pure	8
I-4-3-2-Auto alimentation avec compoundage série	9
I-4-3-2-1-Mise en série des circuits alternatifs	11
I-4-3-2-2-Mise en série des circuits continus.....	14
I-4-3-3-Auto-alimentation avec compoundage parallèle.....	17
I-4-3-3-1-Mise en parallèle des circuits alternatifs.....	19
I-4-3-3-2-Mise en parallèle des circuits continus.....	20
I-4-3-4-Champ clignotant pour les excitateurs statiques	22

CHAPITRE II : Contrôle et protection des systèmes d'excitation

II-1-Introduction	23
II-2-Comportement vis-à-vis des petites perturbations.....	23
II-2-1-Réglage de tension	23
II-2-2-Critère de performances	24

II-3-Comportement vis-à-vis des grandes perturbations	29
II-4-Régulateurs des systèmes de tension et des systèmes d'excitation	30
II-4-1-Introduction	30
II-4-2-Régulateurs de tension (ou AVR)	31
II-4-3- Les régulateurs de puissance (ou PSS)	34
II-4-4-Conclusion	35

CHAPITRE III : Etude par simulation d'un système d'excitation accouplé à une machine synchrone

III-1-Introduction.....	38
III-2-Description du système de simulation	38
III-3-Schéma de simulation.....	39
III-4-Paramètres des éléments du système	41
III-5-Résultats de simulation	43
III-6-Interprétation des résultats	48
III-7-Conclusion.....	50
Conclusion générale	51
Bibliographie	52



Introduction générale

Introduction générale :

L'utilisation des machines électriques est l'objet d'une évolution très rapide, ainsi le domaine d'application des machines à courant alternatif s'est considérablement étendu avec le développement de l'électronique de puissance.

En effet, les convertisseurs statiques en association avec des machines permettant aujourd'hui de réaliser des convertisseurs électromécaniques. C'est-à-dire que la commutation électronique remplace avantageusement la commutation mécanique des machines à courant continu.

Les machines synchrones qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou système d'excitation. En outre, l'existence de ce dispositif permet, suivant les cas, de régler la tension ou de la puissance réactive de la machine synchrone. Les performances obtenues doivent être en accord avec les conditions d'exploitation de la machine, en particulier les protections de la machine synchrone elle-même et, éventuellement, celles du réseau électrique auquel elle est reliée. Le comportement vis-à-vis des petites perturbations dépend principalement de la présence ou de l'absence d'une machine amplificatrice intermédiaire à flux variable, excitatrice à courant continu ou alternateur-excitateur, et de la conception du régulateur qui lui est associé. Le comportement vis-à-vis des grandes perturbations dépend, lui principalement de la source de puissance du système d'excitation. Une source réellement indépendante des perturbations subies par la machine synchrone peut être obtenue d'un alternateur à aimants permanents montés sur la ligne d'arbre, mais cela implique l'utilisation d'une machine amplificatrice intermédiaire et reste limité aux machines de plus petite puissance. Une auto-alimentation à dérivation pure et la plus facile et la plus économique à réaliser, mais ses performances dépendent directement des perturbations subies par la machine synchrone.

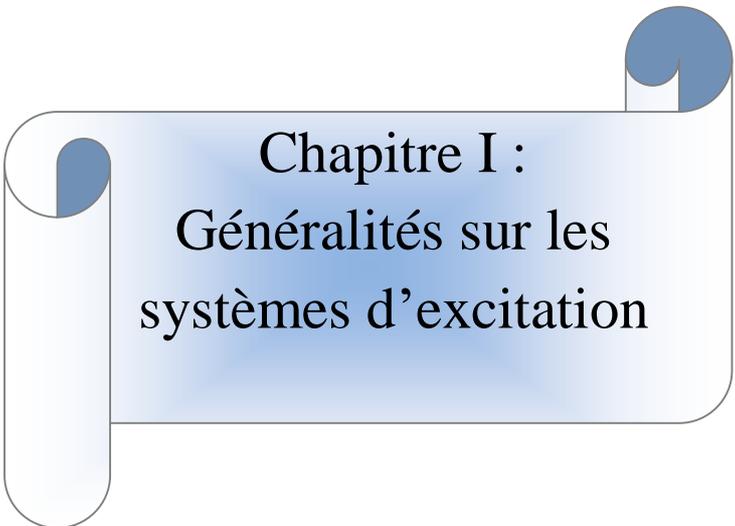
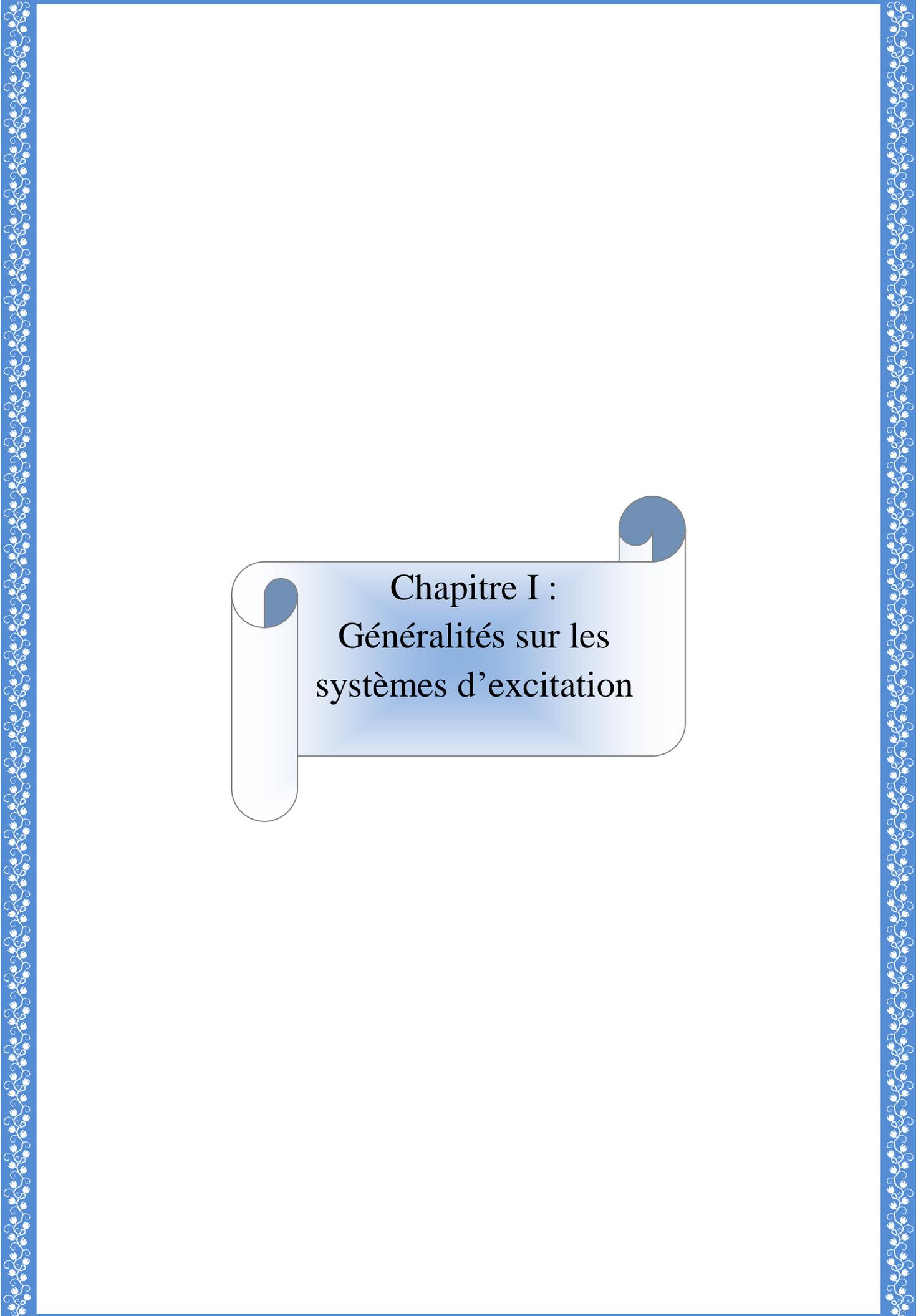
De nombreuses combinaisons d'auto-alimentation compound permettent d'obtenir un bon comportement de la machine synchrone en régime perturbé, au prix d'une conception plus complexe et également d'un coût plus élevé. Le dimensionnement des systèmes d'excitation doit également prendre en compte les contraintes de tenue en tension et de tenue en courant correspondant à leurs conditions d'utilisation.

Notre étude a consisté à présenter dans le premier chapitre des généralités sur les systèmes d'excitation en axant sur les différents modes d'excitation.

Dans le second chapitre, nous avons donné un aperçu sur le contrôle et le réglage des systèmes d'excitation en cas de perturbations.

Une étude par simulation d'un système excitation-machine synchrone a fait l'objet du troisième chapitre.

Enfin nous avons achevé notre travail par une conclusion générale mettant en exergue la nécessité de compléter notre étude par une modélisation des systèmes d'excitation.



Chapitre I : Généralités sur les systèmes d'excitation

Introduction :

La fonction de base de l'excitation est de fournir le courant continu aux bobines créant le champ au rotor de la machine synchrone. De plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive, ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau, respect des limites des machines, le tout par le biais de la tension d'excitation.

I-1-Définition du système d'excitation :

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation. Il comporte :

- la source de puissance qui fournit la puissance d'excitation.
- un régulateur qui agit sur l'entrée de l'excitatrice pour contrôler la puissance délivrée par la source d'excitation.
- des amplificateurs pour adapter la machine synchrone aux conditions d'exploitation.

I-2-Exemple de système d'excitation :

La figure I.1 donne un diagramme fonctionnel du système d'excitation d'un grand générateur synchrone.[2]

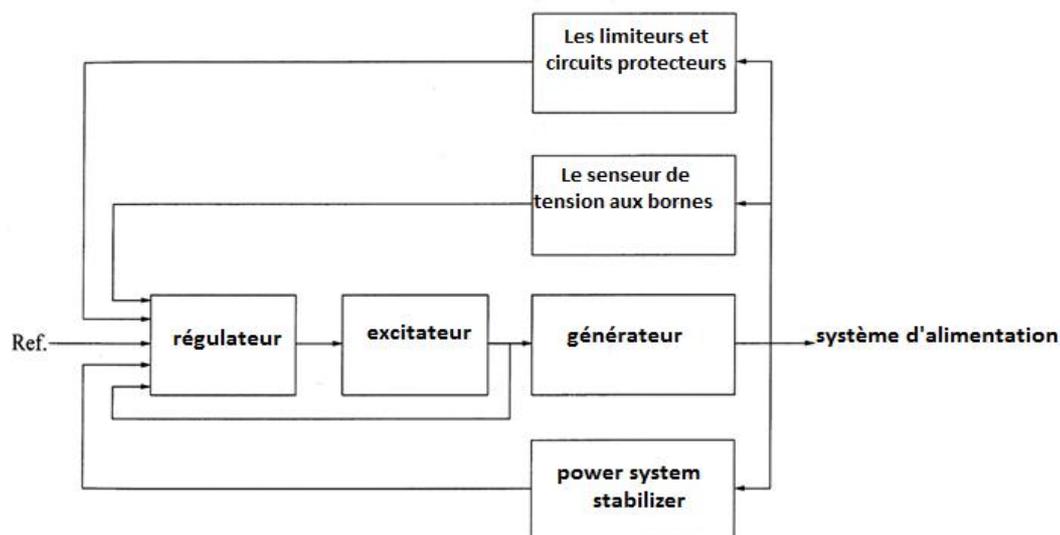


Figure I.1 : diagramme fonctionnel du système d'excitation d'un générateur synchrone. [2]

- L'excitatrice : Elle fournit la puissance aux enroulements inducteurs. Elle constitue l'élément principal du système d'excitation.
- Le régulateur : Il transite et amplifie les signaux de contrôle de l'entrée de l'excitatrice pour une valeur et forme adéquats du courant d'excitation.
- Régulateur de tension et compensation de charge : Il détermine, redresse et filtre la tension terminale du générateur et la compare avec une référence qui représente la tension désirée.

On ajoute aussi des compensateurs de charge pour fixer la tension à une valeur constante.

- Le système stabilisateur de puissance: PSS

Le PSS: (Power System Stabilizer) est un régulateur qui fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur afin d'amortir les oscillations.

Les signaux d'entrée sont généralement :la variation de vitesse, la puissance d'accélération ou la variation de fréquence.

I-3- Fonctions devant être assurées par le système d'excitation :

Le système d'excitation des machines synchrones est amené à jouer un rôle important dans deux catégories de circonstances :

- d'une part, il assure le réglage de tension dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les conditions extérieures appliquées, et notamment la tension aux bornes, ne varient pas avec simultanément une grande amplitude et une grande rapidité. On considère dans ce cas le comportement du système vis-à-vis des petites perturbations.

- d'autre part, il contribue au rétablissement de conditions normales de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude, des conditions extérieures appliquées, et notamment de la tension aux bornes. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des grandes perturbations. [1]

I-4-Type des systèmes d'excitation :

Dans l'étude du système d'excitation intervient, d'une part, le choix des sources d'excitation, et, d'autre part, les moyens mis en œuvre pour faire varier le courant d'excitation.

On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation : excitation continue, alternative ou statique.

Toutes ces sources tirent leur énergie de la machine synchrone, soit sous forme mécanique à partir de la ligne d'arbre dans les deux premiers cas, soit directement sous forme électrique dans le troisième.

I-4-1-Excitation à courant continu (C.C) :

L'excitatrice est munie d'un enroulement d'excitation séparée pour obtenir les variations de flux permettant la variation de sa tension aux bornes.

Pour diminuer l'importance de la source alimentant l'enroulement d'excitation, l'excitatrice peut être munie d'un enroulement d'auto-excitation en dérivation pour fournir la tension et le courant correspondant au fonctionnement à vide de la machine principale. [1]

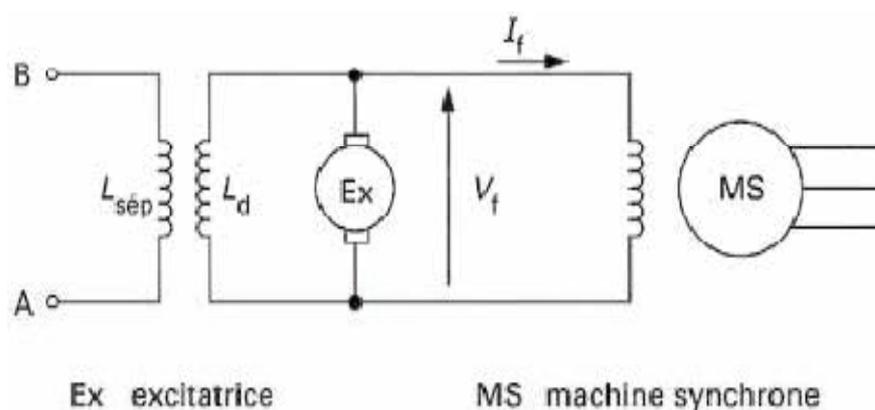
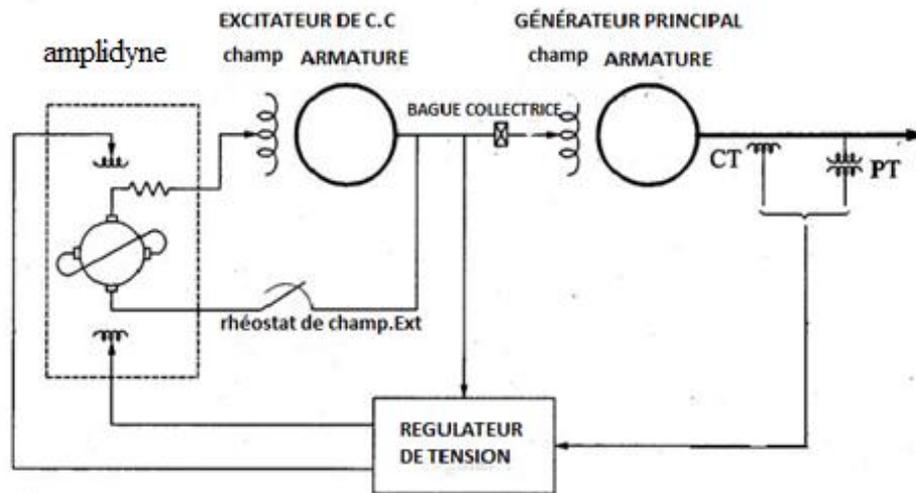


Figure I.2: Principe de l'excitation par machine à courant continu

Cette catégorie de système d'excitation utilise des génératrices à courant continu comme source de puissance d'excitation et fournit le courant au rotor de la machine synchrone à travers un collecteur à bagues. (Voir figure I.3). [2]



Amplidyne : Enroulement auxiliaire crée un champ au stator de l'excitatrice à C.C

Figure I.3 : Système d'excitation à C.C avec un régulateur de tension

Les systèmes d'excitation à courant continu disparaissent graduellement, les systèmes plus anciens sont remplacés par des systèmes d'excitation à courant alternatif, ou par des systèmes statiques.

Dans certains cas, seuls les régulateurs de tension ont été remplacés par des régulateurs électroniques à semi-conducteur moderne.

I-4-2 Excitation à courant alternatif (C.A) :

Dans ce cas, l'excitatrice est une machine à courant alternatif (alternateur). Dans la plupart des cas, l'excitatrice est sur le même arbre que le générateur principal. La sortie alternative de l'excitatrice est bien entendu redressée pour alimenter en continu les bobines du rotor du générateur principal.

Il existe deux variantes selon que l'alternateur-excitatrice est de conception classique, c'est-à-dire à inducteur tournant et induit fixe, ou l'inverse. La figure I.4 représente schématiquement

ces deux variantes et, pour les rendre plus claires, on a indiqué la démarcation entre les éléments fixes et les éléments tournants. Lorsque les courants doivent traverser cette démarcation, il est nécessaire d'utiliser bagues et balais.

L'alternateur-excitateur est accouplé sur le même arbre que le rotor de la machine principale, si bien que l'avantage de la solution de la figure I.4.b est de ne nécessiter aucun contact glissant. Cet avantage est très important dans le cas des très gros alternateurs, dont le courant d'excitation atteint des valeurs élevées (plus de 3 000 A pour un alternateur de 600 MW). [1], [4]

Cependant, la solution de la figure I.4.b est délicate constructivement : d'une part, il est plus difficile de faire tourner un induit qu'un inducteur, car le premier supporte des tensions et des courants beaucoup plus élevés, et, d'autre part, les redresseurs, tournant à grande vitesse, sont soumis à des contraintes mécaniques importantes.

C'est pourquoi les deux solutions sont utilisées à l'heure actuelle pour l'excitation des très gros turboalternateurs.

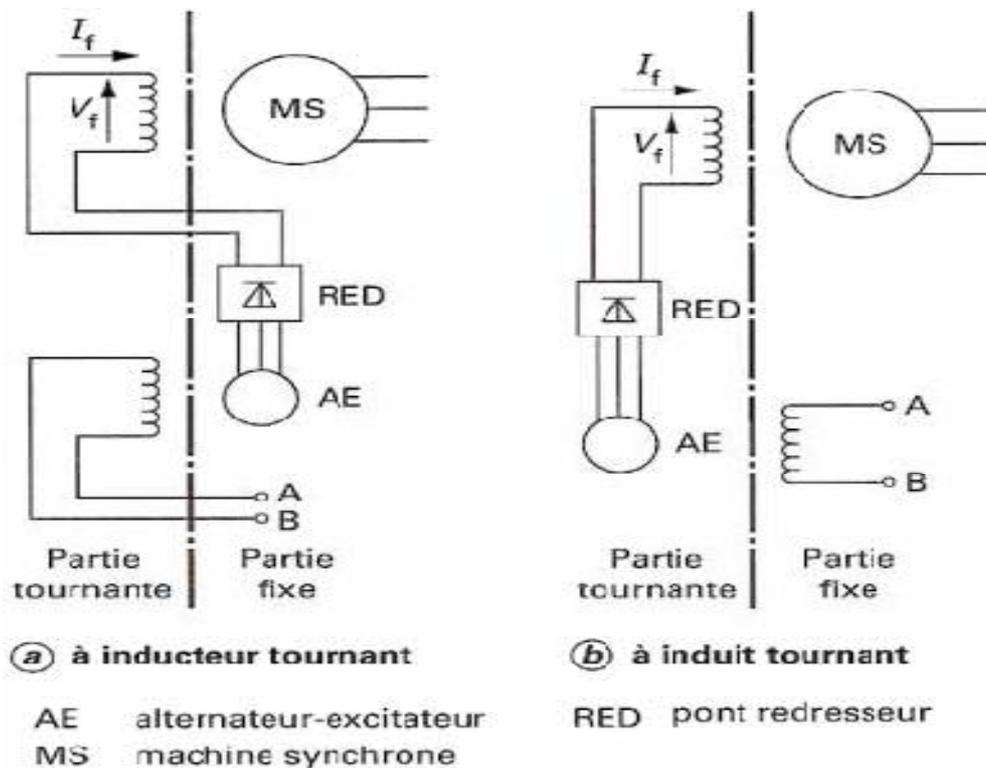


Figure I.4 : Principe de l'excitation par alternateur-excitateur

▼ Dimensionnement des systèmes d'excitation à redresseurs :

La source de puissance des systèmes d'excitation doit être à même de supporter les contraintes liées au fonctionnement en régulation de tension et aux régimes anormaux que la machine synchrone peut subir. Du fait de leur faible inertie thermique, les redresseurs doivent être prévus en fonction de l'amplitude et de la durée de ces contraintes.

- En ce qui concerne la tenue en tension, le fonctionnement au plafond ne correspond pas à la contrainte la plus sévère. Les principales perturbations donnant lieu à surtension sont:
 - le fonctionnement hors synchronisme consécutif à une réduction du courant d'excitation ;
 - le faux couplage ; et, dans le cas d'auto-excitation :
 - les surtensions en provenance du réseau ;
 - la désexcitation rapide. Pour l'ensemble de ces perturbations, la surtension maximale est de l'ordre de 5 fois la tension d'excitation nominale en charge, et les redresseurs sont généralement dimensionnés et essayés pour cette valeur. Compte tenu des performances des redresseurs actuellement disponibles, ce résultat peut généralement être atteint avec un seul redresseur en série par bras de pont. Des dispositifs peuvent être prévus pour limiter les surtensions de courte durée. Une attention particulière doit cependant être apportée aux machines synchrones à rotor feuilleté (notamment les machines à pôles saillants), pour lesquelles le fonctionnement hors synchronisme peut conduire à des surtensions nettement supérieures (plus de 10 fois la tension d'excitation), nécessitant la mise en service automatique d'une résistance de décharge aux bornes de l'inducteur.

- En ce qui concerne la tenue en courant, le défaut le plus sévère est le court-circuit à la sortie du pont redresseur, le courant correspondant pouvant dépasser 5 fois le courant d'excitation nominal. Une autre cause de surintensité dans les redresseurs est le court-circuit aux bornes de la machine synchrone ou aux bornes à haute tension de son transformateur.

Comme indiqué au début du paragraphe, l'aptitude des redresseurs à supporter une surintensité dépend de la durée d'application.

On peut donner comme ordre de grandeur de l'aptitude requise :

- environ 3 à $4I_{fn}$, pendant 0,2 s ;
- environ 2 à $3I_{fn}$, pendant 1 s ;
- environ 1,2 à $1,6I_{fn}$, en permanence.

Généralement plusieurs redresseurs en parallèle sont nécessaires par bras de pont et, lorsque la fiabilité de l'installation l'exige, on en installe un et quelquefois deux en supplément. [1]

I-4-3 Sources statiques (auto alimentation) :

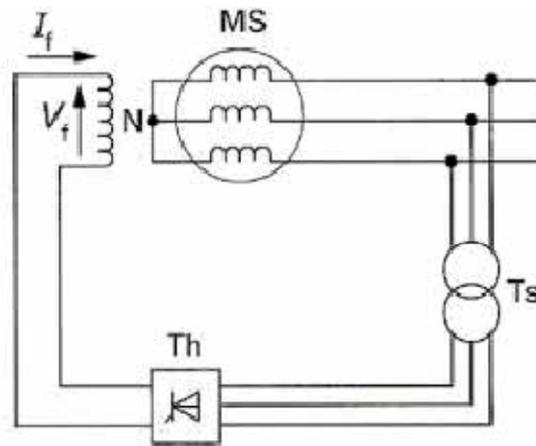
Tous les composants dans ces systèmes sont statiques ou stationnaires. Les redresseurs statiques, commandés ou non commandés, fournissent le courant d'excitation directement à l'inducteur du générateur synchrone principal par des bagues coulissantes.

Il existe deux procédés d'auto alimentation : à dérivation pure et à compoundage.

I-4-3-1-Auto alimentation à dérivation pure :

Le pont de thyristors alimentant l'enroulement inducteur est lui-même alimenté par un système de tensions alternatives par le secondaire d'un transformateur triphasé dont le primaire est connecté aux bornes de la machine synchrone principale (figure I.6).

Il est nécessaire que les redresseurs soient des thyristors, et non des diodes, de façon à pouvoir faire varier la tension V_f , en fonction de la charge, de telle sorte que la tension aux bornes de la machine synchrone reste constante. L'amorçage et la stabilité de ce système bouclé s'étudient de la même façon que pour une génératrice à courant continu à excitation en dérivation. En général, la tension, due au flux rémanent de la machine principale, est trop faible pour permettre l'amorçage (compte tenu de la chute de tension dans les thyristors) et il faut donc utiliser une source auxiliaire.



MS machine synchrone Ts transformateur de soutirage
 Th pont de thyristors

Figure I.5: Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation pure

I-4-3-2 Auto alimentation avec compoundage série :

Un exemple d'une telle réalisation est représenté sur la figure I.6

La tension d'excitation $V_f = V_T + V_I$ est la somme de deux termes :

- une tension continue V_T , proportionnelle à la tension aux bornes de la machine synchrone, obtenue par un transformateur et un pont de thyristors comme dans le cas de la figure I.5
- une tension continue V_I , fonction du courant débité par la machine synchrone, obtenue à l'aide de trois transformateurs d'intensité placés dans les sorties côté neutre des phases de la machine synchrone. Ces trois transformateurs d'intensité débitent dans un pont de diodes. Il ne peut s'agir de transformateurs d'intensité au sens strict, c'est-à-dire tels que le courant secondaire soit strictement proportionnel au courant primaire, sinon I_f serait imposé par ce courant primaire quel que soit V_T : il n'y aurait pas compoundage. On est donc obligé de désolidariser partiellement les courants primaire et secondaire des transformateurs d'intensité, en leur imposant un courant magnétisant élevé, ce qui s'obtient en disposant un entrefer dans leur circuit magnétique. Il en résulte un surdimensionnement non négligeable.

Avec ce système, la tension d'excitation croît en même temps que le courant induit de la machine synchrone, ce qui correspond justement à ce qu'exige la théorie. Mais la tension d'excitation ne s'ajuste pas exactement à la valeur désirée ; c'est pourquoi on parfait le réglage à l'aide des thyristors du pont tension Th.

La réalisation de la figure I.6 correspond à la mise en série de deux tensions continues. [1]

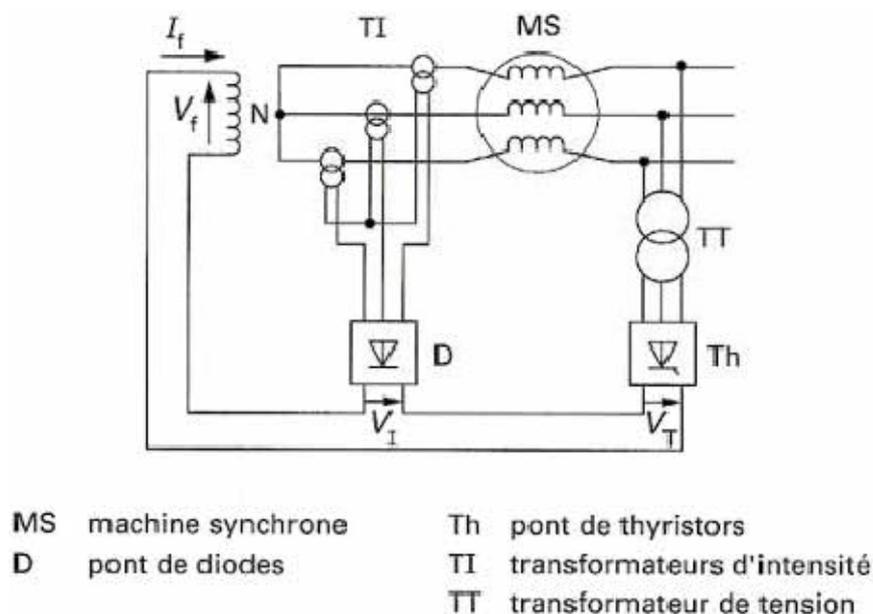


Figure I.6 : Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage continu série

Il est possible de réaliser la mise en série par le côté alternatif conformément à la figure I.7. Dans ce cas, la tension d'excitation est proportionnelle non plus à la somme arithmétique de V_T et de V_I , mais à une composition vectorielle de ces deux grandeurs qui se rapproche davantage de la loi naturelle de variation de la tension et du courant d'excitation avec la charge.

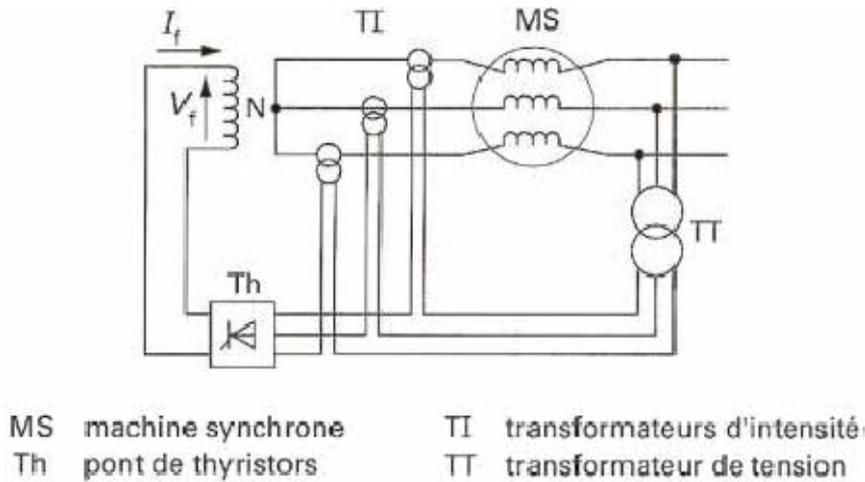


Figure I.7 : Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage alternatif série

I-4-3-2-1 Mise en série des circuits alternatifs :

Ce cas correspond au schéma de la figure I.7. Nous allons établir la loi de compoundage à partir du schéma monophasé équivalent de l'équipement en ne considérant que le premier harmonique des grandeurs alternatives, ce qui permet de raisonner en nombres complexes.

Le schéma monophasé équivalent comporte (figure I.8) :

- la machine synchrone principale avec sa tension \underline{V}_G et son courant \underline{I}_G .
- le transformateur d'intensité dont le schéma équivalent avec fuites totales ramenées au primaire comporte :
 - un transformateur parfait de rapport $-L_{21}/M_{11}$ (différent quelque peu du rapport du nombre des spires à cause de l'entrefer),
 - une inductance de magnétisation L_{21} au secondaire,
 - une inductance de fuites totales N_{11} au primaire, définie par :

$$N_{11} = L_{11} - (M_{11}^2 / L_{21}) \quad (\text{I.1})$$

L_{11} étant l'inductance propre du primaire ;

— le transformateur de tension, dont le schéma équivalent peut être réduit à un transformateur parfait de rapport $-m$ et une inductance de fuites totales ramenée au secondaire N_{2T} .

Appelons \underline{I}_S le courant secondaire commun aux deux transformateurs et \underline{V}_S la tension aux bornes du pont redresseur ; nous allons d'abord supposer que le pont est constitué de diodes à commutation parfaite. Dans ces conditions \underline{V}_S et \underline{I}_S sont respectivement proportionnels à la tension et au courant d'excitation ; ils sont en phase et leur quotient est une résistance pure R proportionnelle à la résistance du circuit inducteur, le coefficient de proportionnalité dépendant de la nature du pont redresseur.

En considérant les enroulements secondaires des deux transformateurs comme générateurs, et en supposant que la tension au primaire du transformateur de tension peut être considérée comme égale à \underline{V}_G (du fait de la faible puissance du transformateur de tension), on peut écrire:

$$-\underline{V}_1 = j L_{21} \omega \underline{I}_S + j M_I \omega \underline{I}_G \quad (I.2)$$

$$-\underline{V}_T = m \underline{V}_G + j N_{2T} \omega \underline{I}_S \quad (I.3)$$

d'où :

$$\underline{V}_S = \underline{V}_1 + \underline{V}_T = -m \underline{V}_G - j \omega \underline{I}_S (L_{21} + N_{2T}) - j M_I \omega \underline{I}_G = R \underline{I}_S \quad (I.4)$$

d'où l'expression du courant :

$$\underline{I}_S = \frac{-m \underline{V}_G + j M_I \omega \underline{I}_G}{R + j \omega (L_{21} + N_{2T})} \quad (I.5)$$

— La prise en compte de la commutation correspond à une chute de tension continue proportionnelle au courant I_s et dépendant notamment des réactances de fuites des deux transformateurs. [1]

I-4-3-2-2 Mise en série des circuits continus :

Ce cas correspond au schéma de la figure I.6. Les tensions V_T et V_I étant des grandeurs continues, elles s'additionnent algébriquement et non plus vectoriellement comme dans le cas précédent. Le système ne reproduit plus naturellement le diagramme simplifié des machines synchrones. La détermination des caractéristiques des différents éléments, principalement des transformateurs, est basée sur des considérations plus pratiques dans des situations particulières.

La partie compound est constituée des transformateurs, de courant à entrefer T_I et du redresseur à diodes D . Son fonctionnement correspond au cas général des redresseurs à diodes.

La figure I.9 décrit cette caractéristique pour le redresseur triphasé double alternance exprimée en valeur relative par rapport à la tension redressée à vide V_{max} et au courant de court-circuit I_{cc} . Cette caractéristique est composée de trois parties correspondant à différentes valeurs de l'angle de commutation entre les phases :

- un segment de droite AB de pente $-1/\sqrt{3}$ pour des commutations simples de moins de 60 degrés.
- un arc de cercle BC de rayon $\sqrt{3}/2$ pour des commutations de plus de 60 degrés débutant sur une polarité avant la fin des commutations sur la polarité opposée.
- un segment de droite CD de pente $\sqrt{3}$ pour des commutations de plus de 120 degrés. [1]

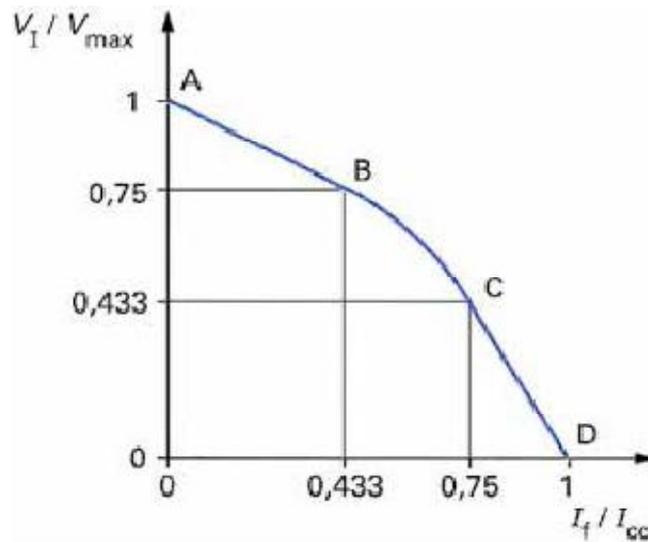


Figure I.9 : Caractéristique du pont de diodes triphasé double alternance

La tension alternative \underline{V}_I au secondaire du transformateur TI, le redresseur étant à vide, est :

$$\underline{V}_I = j M_I \omega \underline{I}_G \quad (\text{I.6})$$

et la tension redressée correspondante :

$$V_{max} = 3 \sqrt{2} / \pi |\underline{V}_I| = 3 \sqrt{2} / \pi M_I \omega |\underline{I}_G| \quad (\text{I.7})$$

Le courant de court-circuit du transformateur étant :

$$\underline{I}_S = - M_I / L_{2I} |\underline{I}_G| \quad (\text{I.8})$$

Le courant de court-circuit du redresseur est :

$$I_{cc} = \sqrt{2} |\underline{I}_S| = \sqrt{2} M_I / L_{2I} |\underline{I}_G| \quad (\text{I.9})$$

À chaque régime de fonctionnement de la machine synchrone il correspond un courant d'excitation I_f et un courant statorique I_G , d'où une valeur V_{\max} et un courant de court-circuit I_{cc} . À partir de I_f/I_{CC} , la caractéristique donne le rapport V_I/V_{\max} , d'où la tension redressée V_I .

▼ Dimensionnement de la partie courant

Le but d'un système compound est de permettre de fournir la tension d'excitation nécessaire à chaque cas de fonctionnement. En particulier, il est souvent demandé aux systèmes compound d'être capables de maintenir un courant permanent pour un court-circuit triphasé aux bornes de la machine synchrone. Cette condition fixe un minimum de taux de compoundage à assurer. En effet, la participation de la partie tension (Th) est nulle, le redresseur D doit fournir toute la tension d'excitation V_f . D'autre part dans ce cas, la valeur de V_f nécessaire au maintien du courant I_G est proportionnelle à I_G . La caractéristique en court-circuit de la machine synchrone peut être définie par :

$$I_{fcc} = K_{fcc} |I_G| \quad (I.10)$$

d'où :

$$V_{fcc} = R_f I_{fcc} = R_f K_{fcc} |I_G| \quad (I.11)$$

Donc, pour un courant I_G , la tension fournie par le redresseur D débitant le courant I_{fcc} doit être supérieure ou égale à V_{fcc} . Cela constitue une condition nécessaire de dimensionnement de la partie compound. La caractéristique doit être complétée par une autre condition, par exemple usuellement $V_{fcc}/V_{\max} = 0,7$ à $0,8$. [1]

▼ Dimensionnement de la partie tension

Le système ne reproduisant naturellement pas le diagramme de la machine synchrone et l'action de la partie courant ayant été déterminée, la partie tension doit être dimensionnée pour permettre un fonctionnement stable à tout régime de la machine synchrone. Le problème

se pose aux régimes d'absorption de puissance réactive où la partie courant fournit une tension V_I croissante en fonction de I_G , alors que la tension totale nécessaire V_f est décroissante.

Cet écart doit être compensé par la partie tension (Th). L'écart pouvant être négatif, le redresseur Th est entièrement contrôlé, c'est-à-dire composé uniquement de thyristors. Pour chaque régime, les tensions V_f et V_I sont connues, la partie tension doit pouvoir fournir :

$$V_T = V_f - V_I$$

Ce calcul doit être effectué pour la puissance réactive absorbée maximale, à puissance active nulle et maximale. Généralement, ce calcul définit les possibilités que doit avoir Th en onduleur. Par ailleurs, les conditions de surexcitation demandées définissent les possibilités que doit avoir Th en redresseur. La plus contraignante de ces conditions définit enfin la tension secondaire du transformateur de tension TT.

I-4-3-3 Auto alimentation avec compoundage parallèle :

On peut réaliser un compoundage par la mise en parallèle des circuits alternatifs, conformément à la figure I.10, en utilisant un transformateur de courant T à trois enroulements:

- le primaire, placé côté neutre, est traversé par le courant de la machine synchrone ;
- le secondaire est alimenté en dérivation sur la sortie de la machine synchrone par l'intermédiaire d'une inductance L en série ;
- le tertiaire débite dans un pont redresseur à diodes D, destiné à alimenter l'inducteur de la machine synchrone. Le courant dans l'enroulement tertiaire résultant de l'addition vectorielle des courants des enroulements primaires et secondaires approche la loi naturelle de variation du courant d'excitation. [1]

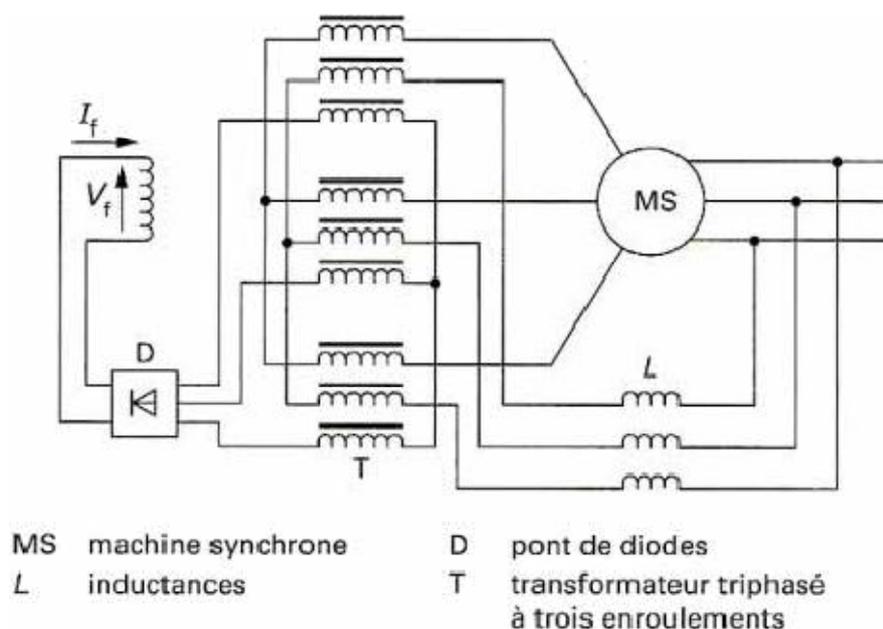


Figure I.10 : Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage alternatif parallèle

La mise en parallèle des circuits tension et courant peut également être réalisée de façon plus simple côté continu suivant la figure I.11.

En fonctionnement normal, le pont de diodes D alimenté par les transformateurs de courant TI délivre un courant proportionnel au courant stator de la machine synchrone MS. La tension d'excitation est entièrement contrôlée par le pont de thyristors Th alimenté par le transformateur de tension TT tant que le courant d'excitation de MS est inférieur au courant délivré par le pont de diodes D. Ce principe restreint les possibilités d'absorption de puissance réactive.

Le pont de diodes D étant connecté en parallèle avec le redresseur Th, la tension V_f ne peut pas devenir négative. Le redresseur Th peut donc être entièrement contrôlé, c'est-à-dire composé uniquement de thyristors, ou mixte, c'est-à-dire composé de thyristors sur une polarité de redressement et de diodes sur l'autre.

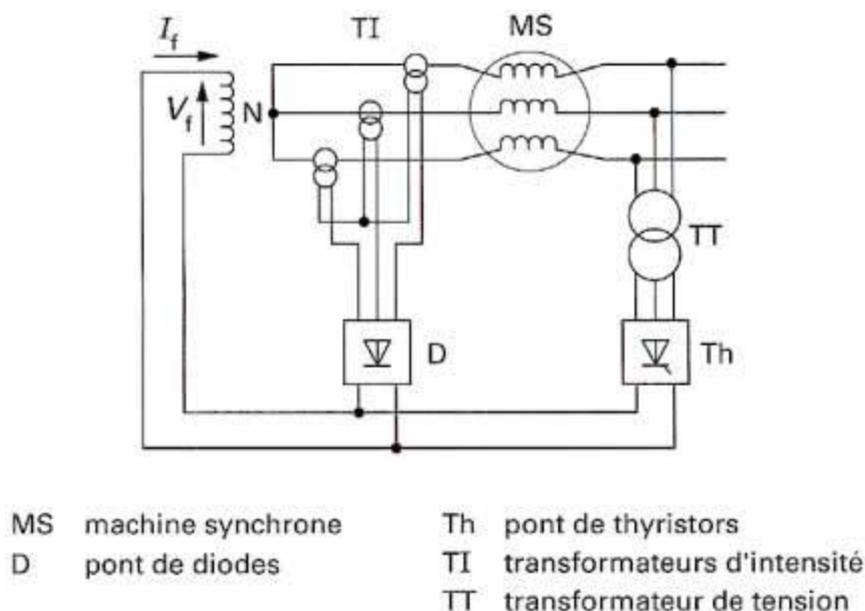


Figure I.11 : Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage continu parallèle

I-4-3-3-1 Mise en parallèle des circuits alternatifs :

Le compoundage parallèle peut être obtenu à l'aide d'un seul transformateur à trois enroulements, conformément à la figure I.8.

Le primaire est parcouru par le courant de la machine synchrone ; le secondaire est en dérivation sur la tension de l'alternateur mais par l'intermédiaire d'une inductance série indispensable à l'obtention du compoundage ; le tertiaire débite sur le pont redresseur.

Avec les mêmes hypothèses que dans le cas du compoundage série, on peut dessiner le schéma monophasé équivalent (figure I.10) et associer des nombres complexes aux grandeurs alternatives.

Nous supposons en outre, dans cette première approche, que le transformateur est parfait, c'est-à-dire que le courant magnétisant est nul et qu'il n'y a pas de fuites magnétiques.

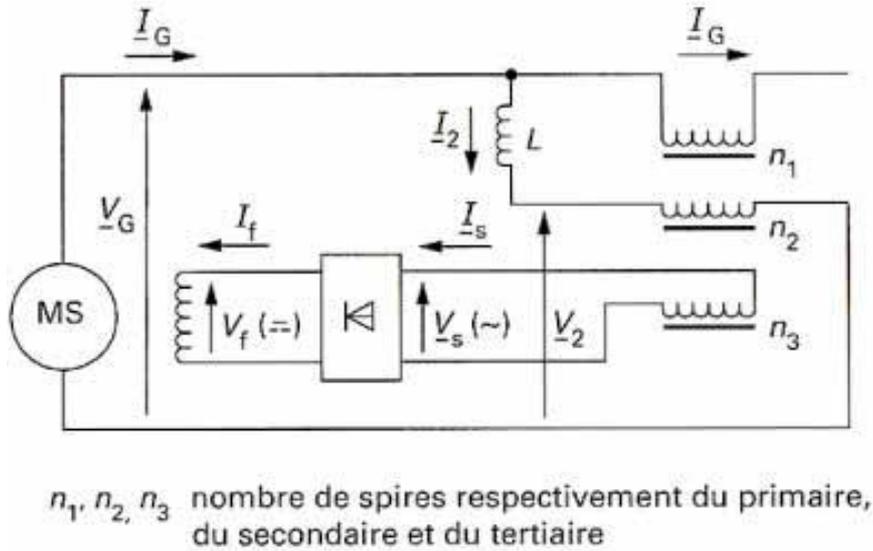


Figure I.12 : Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage alternatif parallèle

Dans ces conditions, et avec les conventions de signes et notations de la figure I.12, les équations sont :

$$n_1 \underline{I}_G + n_2 \underline{I}_2 + n_3 \underline{I}_3 = 0 \tag{I.12}$$

$$\underline{V}_G - \underline{V}_2 = j L \omega \underline{I}_2 \tag{I.13}$$

$$\underline{V}_2 / \underline{V}_S = -n_2 / n_3 \tag{I.14}$$

$$\underline{V}_S = R \underline{I}_S \tag{I.15}$$

On en déduit \underline{I}_S en fonction de \underline{V}_G et \underline{I}_G :

$$\underline{I}_S = \frac{(n_3 n_2) \underline{V}_G + j n_1 n_3 n_2^2 L \omega \underline{I}_G}{R + j (n_3 / n_2)^2 L \omega} \tag{I.16}$$

Cette équation est de même forme que l'équation (I.5), et les mêmes remarques lui sont applicables. Le taux de compoundage est conditionné par le choix de l'inductance L et celui du

rapport de transformation n_1 / n_2 . On peut perfectionner le calcul en tenant compte, en plus des éléments déjà mentionnés à propos du compoundage série, du courant magnétisant au niveau de l'équation (I.5) et des fuites magnétiques au niveau de l'équation (I.7). [1]

I-4-3-3-2 Mise en parallèle des circuits continus :

Ce cas correspond au schéma de la figure I.9. La tension V_f est commune aux deux redresseurs. Les transformateurs de courant sont sans entrefer, donc le courant débité par D est proportionnel à I_G .

Comme dans le cas de la connexion série côté continu, un objectif important est la capacité de la partie courant à maintenir un courant de court-circuit. La relation :

$$I_{fcc} = K_{fcc} |I_G| \quad (I.17)$$

donne le courant minimum que doit fournir D pour remplir cette condition (compoundage à 100 %).

Le dimensionnement en courant de la partie compound se déduit directement du rapport du transformateur et du courant de la machine synchrone.

Le courant I_T débité par le redresseur Th est la différence entre le courant I_f du régime considéré et le courant I_s fourni par le redresseur D. Le maximum est obtenu pour le régime de fourniture de puissance réactive maximale et à puissance active nulle où le courant stator I_G est relativement faible et le courant d'excitation I_f maximal.

Par contre, lorsque le courant I_T devient nul, le redresseur Th ne peut plus contrôler la tension d'excitation V_f , ce qui limite les possibilités de la machine synchrone d'absorber de la puissance réactive. La figure I.13 montre cette limitation dans le plan puissance active/puissance réactive pour une machine synchrone. Suivant le diagramme simplifié, avec la réactance synchrone X_d et un compoundage exact de 100 %, la limitation se produit à :

$$Q = -V^2 / (2X_d) \quad (I.18)$$

alors que la possibilité d'absorption de puissance réactive de la machine synchrone est au moins de :

$$Q = -V_2/X_d \quad (I.19)$$

Comme le montre la figure I.13, avec un réglage hyper compound de 110 %, la limitation est encore plus restrictive. [1]

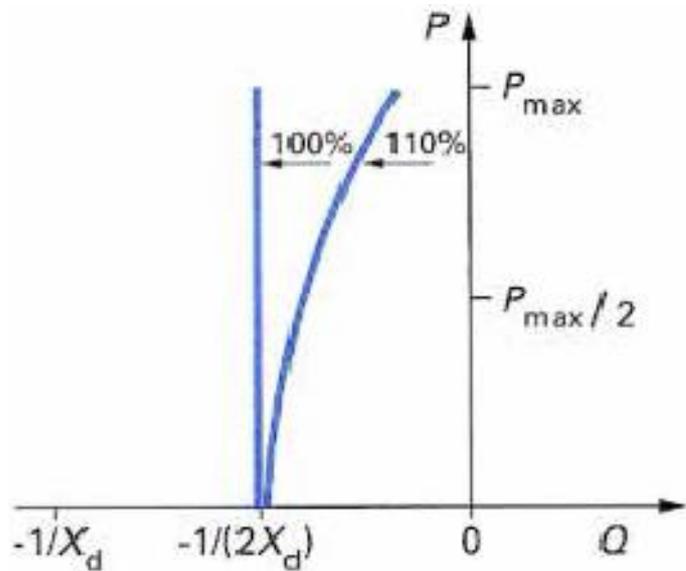
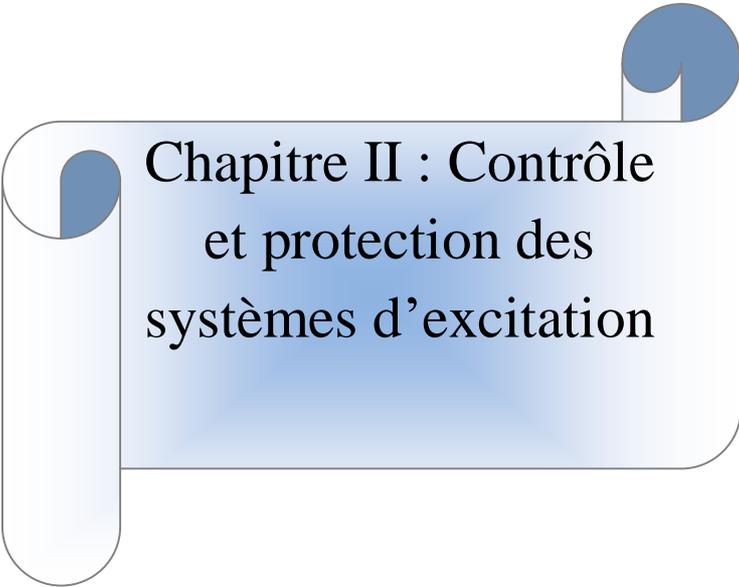
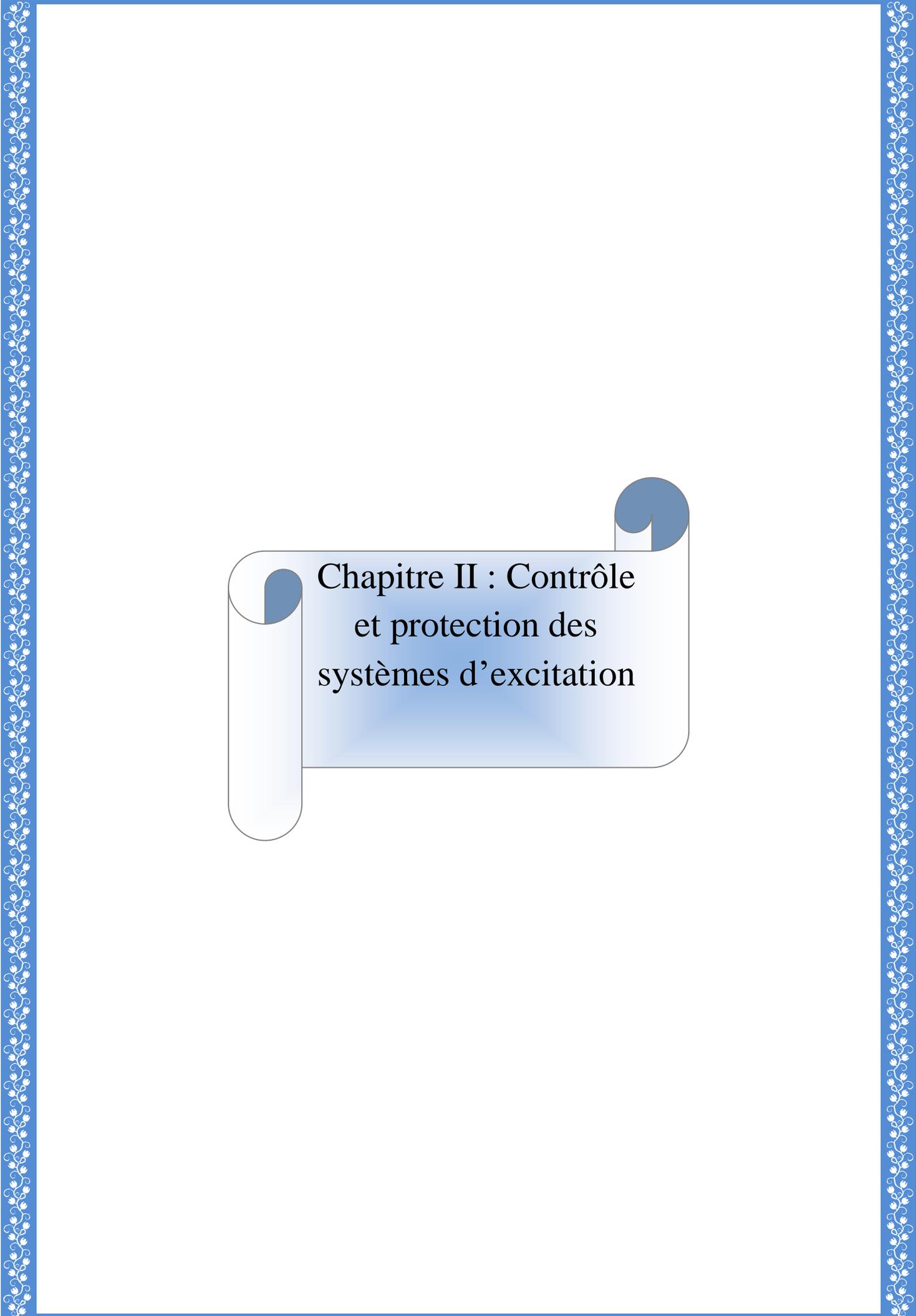


Figure I.13 : Limitation d'absorption de puissance réactive par un système compound parallèle continu

I-4-3-4 Champ clignotant pour les excitateurs statiques :

Puisque la source de puissance d'un système statique d'excitation est le générateur principal (auto-excite). Ce dernier ne peut produire aucune tension jusqu'à ce qu'il y ait un certain champ. Il est donc nécessaire d'avoir une autre source de puissance fonctionnant pour quelques secondes qui fournisse le champ et active le générateur. Ce processus s'appelle clignotant de champ. Cette source utilisée est une batterie de station. [2]



Chapitre II : Contrôle et protection des systèmes d'excitation

Introduction :

Le système d'excitation nécessite des circuits stabilisateurs et protecteurs tels que les régulateurs, les limiteurs afin d'assurer son contrôle et sa protection vis-à-vis des petites et grandes perturbations, dans ce chapitre nous allons définir ces circuits et toutes les fonctions qui les décrivent.

II-1- Comportement vis-à-vis des petites perturbations :

II-1-1- Réglage de tension :

- La première qualité de réglage de tension est la précision. La précision statique, c'est-à-dire la réponse du système d'excitation, une fois atteints les régimes transitoires, peut être caractérisée :

- soit par la variation maximale de la tension $\frac{\Delta V_G}{V_{Gn}}$ admissible lorsque l'on modifie le régime des puissances active et réactive.

(Exemple : $\frac{\Delta V_G}{V_{Gn}} = 1\%$ lorsque l'on passe du régime à vide au régime nominal).

- soit par le gain statique :

$$G = \frac{\Delta V_f / V_{fn}}{\Delta V_G / V_{Gn}}$$

caractérisant la variation relative de la tension d'excitation V_f que le régulateur de tension doit provoquer lorsque se produit une variation de tension ΔV_G aux bornes de la machine synchrone. Un ordre de grandeur usuel est $G \approx 30$. [1]

- La deuxième qualité du réglage de tension est la rapidité. Le système d'excitation doit réagir rapidement à une variation de tension de moyenne importance.

(Par exemple : $\frac{\Delta V_G}{V_{Gn}} = 5 \text{ à } 10\%$). Pour cela, il faut un temps de réponse faible ;

On est aussi amené parfois, à adopter un gain transitoire plus élevé que le gain statique.

- La rapidité peut entrer en conflit avec la stabilité. On peut être alors conduit à adjoindre au système d'excitation des dispositifs stabilisateurs au moyen de divers asservissements (par exemple, asservissements à la puissance active, à l'angle électrique et à ses dérivées, etc.).
- Enfin le système d'excitation peut avoir à assurer des fonctions de limitation, destinées à éviter que les paramètres de fonctionnement de la machine synchrone (courants, tensions, et l'angle interne) n'atteignent les valeurs dangereuses.

II-1-2 Critère de performance :

Les qualités de précision, de rapidité et de stabilité vis-à-vis des petites perturbations peuvent être définies et quantifiées en faisant appel aux critères classiques de la théorie des systèmes asservis. Pour cela, nous allons considérer l'ensemble du système d'excitation et de la machine synchrone selon le diagramme de la figure II.1.

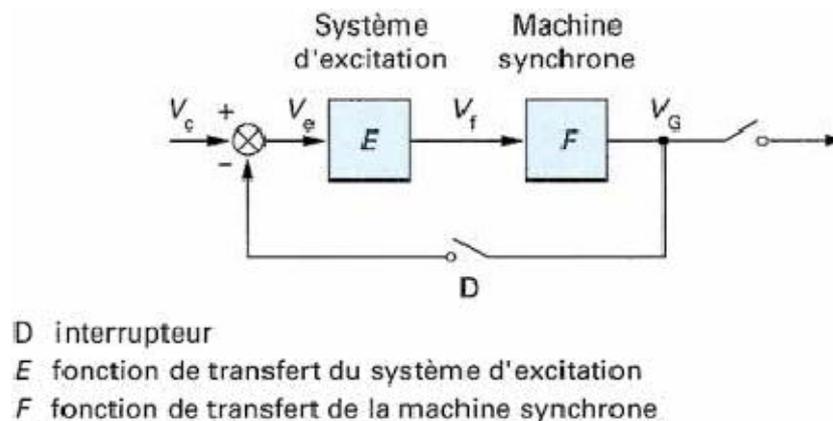


Figure II.1: Schématisation de la machine synchrone et de son système d'excitation

Avec :

V_c : tension de consigne ;

V_f : tension d'excitation ;

V_G : tension de la machine synchrone ;

V_e : tension d'erreur, égale à $V_c - V_G$ lorsque le système fonctionne en boucle fermée et à V_c lorsqu'il fonctionne en boucle ouverte.

E et F : fonctions de transfert, sous forme opérationnelle ou harmonique selon le cas, qui traduisent les relations qui existent entre V_f et V_e , d'une part, et entre V_G et V_f , d'autre part.

Indiquons alors sommairement trois méthodes parmi les plus usuellement adoptées pour caractériser les performances du système d'excitation.

a) **Courbe de réponse unitaire** : la machine synchrone se trouvant à un régime de fonctionnement spécifié (souvent à vide, à tension normale, pour des raisons évidentes de commodité) et le système d'excitation fonctionnant en boucle fermée (interrupteur D fermé, figure II.1), on impose à V_c une variation en échelon de faible amplitude (1 à 2 %) et on observe la loi de variation de V_G en fonction du temps. Une forme typique de la courbe de réponse est celle de la figure II.2, [1]. Les principales grandeurs caractéristiques que l'on peut mesurer sur cette courbe sont :

- le temps de montée t_m , généralement défini entre 10 % et 90 % de la valeur de régime établi, qui caractérise la rapidité.
- le dépassement d , par rapport à la valeur finale.
- le temps d'établissement t_e , c'est-à-dire le temps à partir duquel la tension reste comprise dans une fourchette spécifiée Δ de part et d'autre de la valeur finale (par exemple, ± 5 %), qui caractérise l'amortissement, donc la stabilité.

Les deux paramètres les plus importants sont, dans l'ordre, le temps d'établissement et le temps de montée.

- la valeur du gain aux fréquences basses, qui caractérise la précision ;
- la pulsation de coupure ω_c , pour laquelle $G_1 = 0$;
- la marge de gain G_m (valeur du gain lorsque la phase vaut -180°) ;
- la marge de phase φ_m (valeur algébrique de $\varphi + 180^\circ$ lorsque φ a la valeur φ_c correspondant à ω_c).

Les deux dernières grandeurs caractérisent la stabilité.

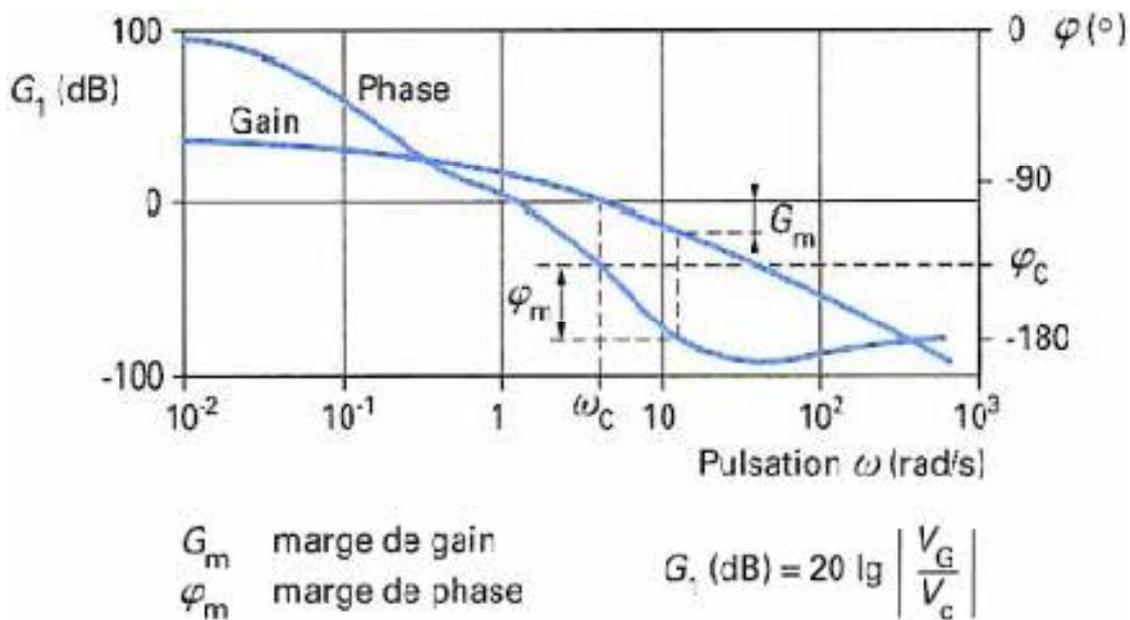


Figure II.3 : Forme typique de la réponse harmonique en boucle ouverte

c) **Réponse harmonique en boucle fermée** : La machine synchrone se trouvant à un régime de fonctionnement spécifié (par exemple à vide, comme dans les deux méthodes précédentes) et l'interrupteur D de la figure II.1 étant fermé, on relève les valeurs de gain et de phase, en fonction de la pulsation, obtenues et définies comme précédemment.

Le rapport des amplitudes est caractérisé par la quantité :

$$G_2 = 20 \log \left| \frac{V_G}{V_C} \right|$$

appelée gain harmonique en boucle fermée et exprimée en décibels. Les courbes ont l'allure typique de la figure II.4 ; les principales grandeurs caractéristiques que l'on mesure directement sur cette courbe sont :

- le coefficient de résonance en boucle fermée Q , valeur maximale du gain exprimé en dB, caractérisant la stabilité ;
- la bande passante BP , valeur de la pulsation lorsque $G_2 = -3$ dB, caractérisant la rapidité.

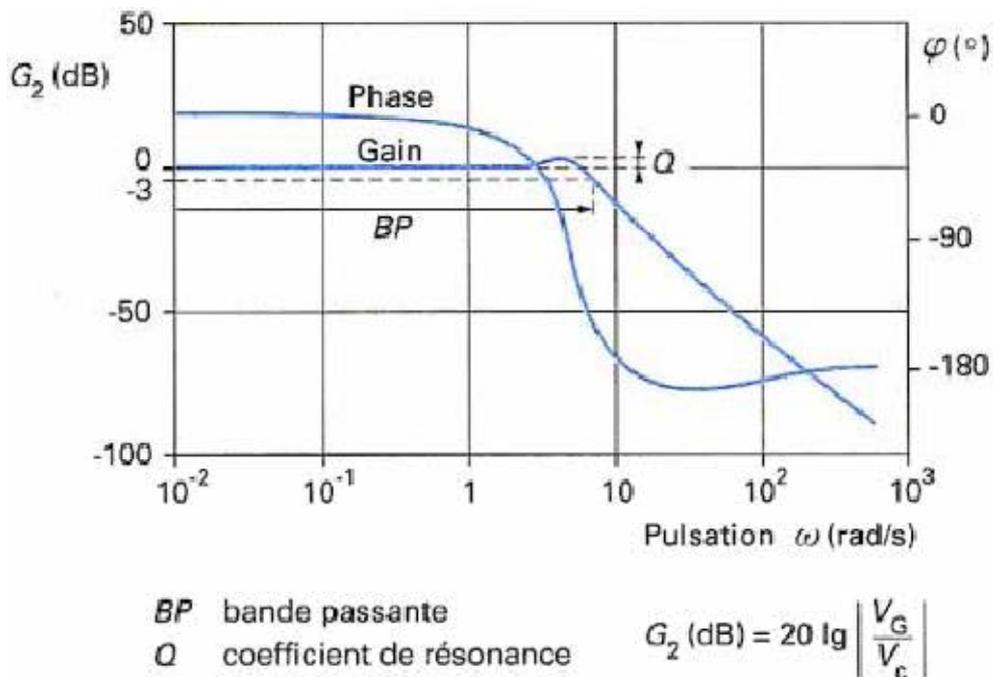


Figure II.4: Forme typique de la réponse harmonique en boucle fermée

II-2- Comportement-vis-à-vis des grandes perturbations :

Les deux exemples types de grandes perturbations vis-à-vis desquelles le système d'excitation a un rôle à jouer sont :

- d'une part, la chute de tension ou de puissance active importante et brutale aux bornes, due à un court-circuit survenant dans le voisinage de la machine synchrone ou à une manœuvre de ligne dans le réseau. Le système d'excitation doit être conçu pour donner rapidement une surexcitation notable qui, en freinant la diminution du flux magnétique de la machine, peut éviter la perte de synchronisme si le défaut n'est pas trop sévère ou s'il est éliminé rapidement. D'une manière générale d'ailleurs, cette surexcitation réduit la chute de tension transitoire que subissent les récepteurs proches de la machine synchrone ;
- d'autre part, la surtension qui se produit lors d'un déclenchement de la machine synchrone fonctionnant initialement en charge. Le système d'excitation doit alors désexciter de manière à maintenir la surtension aux bornes de la machine synchrone dans des limites non dangereuses.

Les paramètres caractérisant la surexcitation sont le plafond et le facteur de réponse.

Le plafond : est la tension maximale que peut délivrer le système d'excitation. Sa durée maximale d'application est généralement précisée.

Il est exprimé par le rapport V_{fp}/V_{fn} de la tension de plafond à la tension d'excitation nominale en charge. Un ordre de grandeur courant est de 1,6 à 2, valeurs pour lesquelles les performances sont satisfaisantes tout en n'entraînant pas un surdimensionnement trop coûteux.[1]

Le facteur de réponse : est la vitesse d'accroissement de la tension d'excitation, en valeur relative, calculée en remplaçant la variation réelle de la tension d'excitation par une variation linéaire en fonction du temps, correspondant à la même valeur moyenne de la tension d'excitation au cours de la première demi-seconde, lorsque le système d'excitation est sollicité par une perturbation conduisant à la montée au plafond.

La figure II.5 illustre cette notion. La courbe ABC représente l'évolution réelle de la tension d'excitation et le segment AD, dont l'extrémité a pour ordonnée $V_{fm(0,5)}$ est tel que :

$$\text{aire OABCE} = \text{aire OADE}$$

Le facteur de réponse est alors donné par la formule : $R = (V_{fm(0,5)} - V_{fn}) / 0,5V_{fn}$ [1]

La quantité ainsi définie s'est avérée caractériser de façon satisfaisante l'aptitude au maintien du flux en cas de défaut.

De même, la désexcitation peut être caractérisée par le plafond négatif et un paramètre traduisant la vitesse de décroissance de la tension d'excitation.

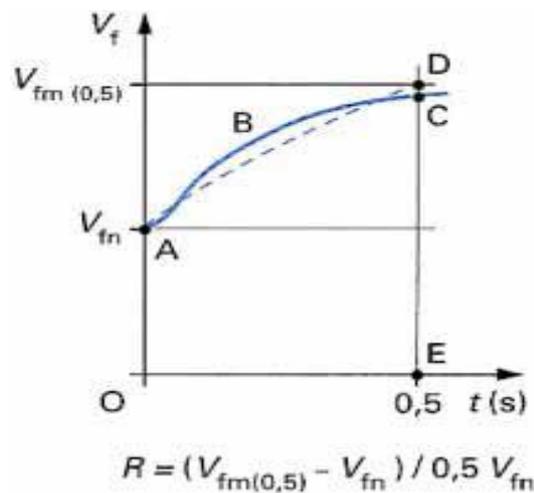


Figure II.5 : Définition du facteur de réponse R

II-3-Régulateurs des systèmes de tensions et des systèmes d'excitation :

II-3-1-Introduction :

Il existe un nombre croissant de correcteurs dans les systèmes de puissance : machines synchrones, réseaux électriques ; pour entre autre augmenter la stabilité, les marges de sécurité ou la puissance transitant sur les lignes.

II-3-2-Régulateurs de tension (ou AVR) :

La première solution aux oscillations des réseaux électriques a été d'équiper les alternateurs d'enroulements amortisseurs.

Cependant, cette solution s'avère insuffisante quand les réseaux s'approchent de leurs limites de stabilité. par ailleurs, les régulateurs de tensions (ou AVR) contribuent à l'amélioration de la performance en régime permanent, mais ils peuvent être insuffisants pour les problèmes relevant de la stabilité transitoire. [3]

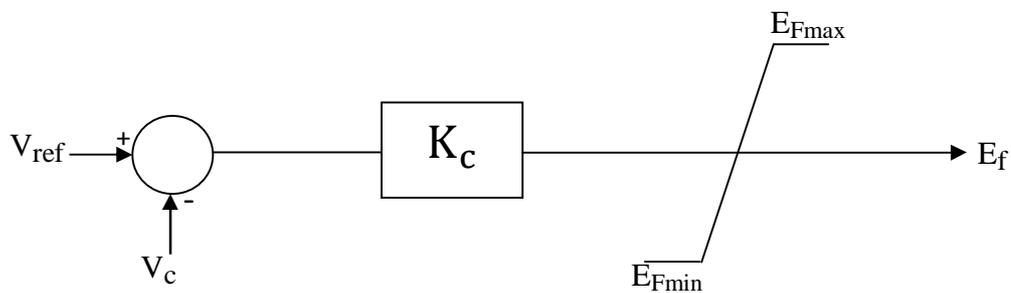


Figure II.6 : Régulation de tension, gain simple

D'après la figure II.6, les équations décrivant cette structure sont données par :

$$E_f = \begin{cases} E_{fmax} & \text{si} & E_f \geq E_{fmax} \\ E_f & \text{si} & E_{fmin} \leq E_f \leq E_{fmax} \\ E_{fmin} & \text{si} & E_f \leq E_{fmin} \end{cases}$$

Avec :

$$E_f = K_c(V_{\text{ref}} - V_c)$$

$$\dot{E}_f = -K_c \dot{V}_c$$

Où :

E_f : est la tension d'excitation de la machine.

K_c : est le gain du correcteur.

V_{ref} : la tension de référence (de sortie) de la machine.

V_c : la tension mesurée à la sortie de la machine.

Dans certains cas, les machines munies d'un PSS contiennent un régulateur de tension standard que montre la figure II.7 :

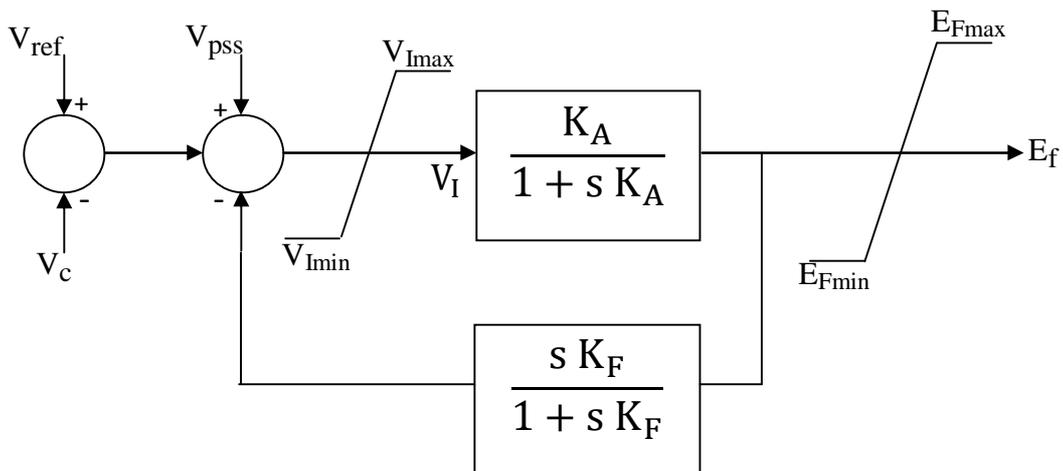


Figure II.7 : Régulateur de tension –type IEEE- ST1

Les équations décrivant ce correcteur sont :

$$V_E = V_{\text{ref}} + V_{\text{PSS}} - V_C - V_F$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_F}{T_F} V_R - \frac{V_F}{T_F}$$

$$\dot{V}_I = -\frac{1}{T_F} V_F - \frac{K_F}{T_A T_F} V_R + \frac{K_F K_A}{T_A T_F} V_I$$

$$V_I = \begin{cases} V_{\text{Imax}} & \text{si} & V_E \geq V_{\text{Imax}} \\ V_E & \text{si} & V_{\text{Imin}} \leq V_E \leq V_{\text{Imax}} \\ V_{\text{Imin}} & \text{si} & V_E \leq V_{\text{Imin}} \end{cases}$$

$$E_f = \begin{cases} E_{\text{fmax}} & \text{si} & V_R \geq E_{\text{fmax}} \\ V_R & \text{si} & E_{\text{fmin}} \leq V_R \leq E_{\text{fmax}} \\ E_{\text{fmin}} & \text{si} & V_R \leq E_{\text{fmin}} \end{cases}$$

Où :

E_f est la tension d'excitation de la machine.

K_A et K_F sont les gains du régulateur.

T_A et T_F : constantes de temps du régulateur.

V_{PSS} : signal de sortie du PSS.

V_F , V_R et V_E : variables intermédiaires.

V_{ref} : tension de référence de la machine.

V_c : tension mesurée en sortie de la machine.

II-3-3-Les régulateurs de puissance (ou PSS):

Pour faire face aux problèmes d'oscillations et d'instabilité, des boucles de régulation (correcteurs) supplémentaires appelées PSS (ou power system stabilizer) sont été ajoutées aux régulateurs de tension AVR. Ces corrections sont destinées à fournir un couple agissant contre les modes oscillatoires qui se manifestent sur les arbres des machines.

Les grandeurs des machines les plus sensibles aux oscillations sont souvent incorporées dans cette boucle comme signal d'entrée : la vitesse, la puissance mécanique, la puissance électrique ou la fréquence.

Un PSS dit "classique" comporte typiquement deux filtres, un passe-haut et passe-bas, un gain et une compensation de phase.

Les filtres passe-haut et passe-bas sont conçus afin de limiter l'action de correcteur dans une bande de fréquence souhaitée.

La compensation de phase, faite par une fonction avance-retard de phase, est conçu pour déplacer le mode d'oscillation instable vers partie gauche du plan complexe et donc vers la stabilité. [3]

Un PSS dit "classique" est représenté, ici sans filtre, sur la figure II.8 :

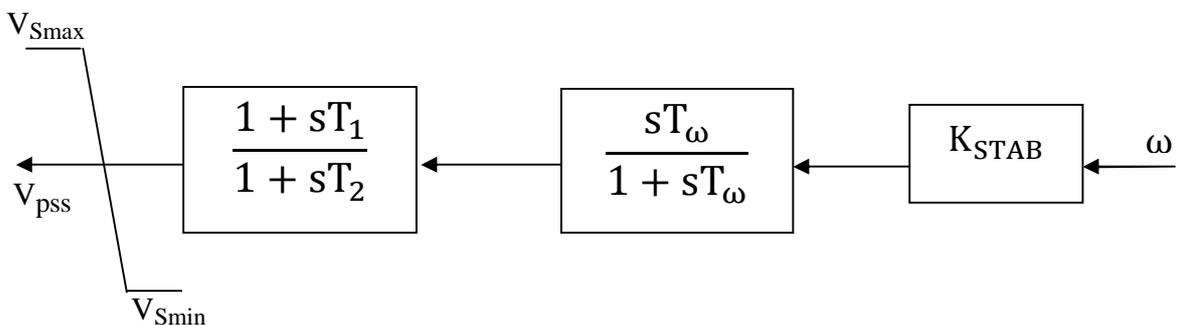


Figure II.8 : PSS classique [3]

Ce PSS comporte une variable d'entrée ω , une compensation de phase (bloc T_1 à T_2), un filtre passe-bas T_ω et un gain K_{STAB} .

V_{pss} est le signal de sortie du correcteur.

Nous montrons la combinaison d'un PSS et d'un AVR grâce à la figure suivante :

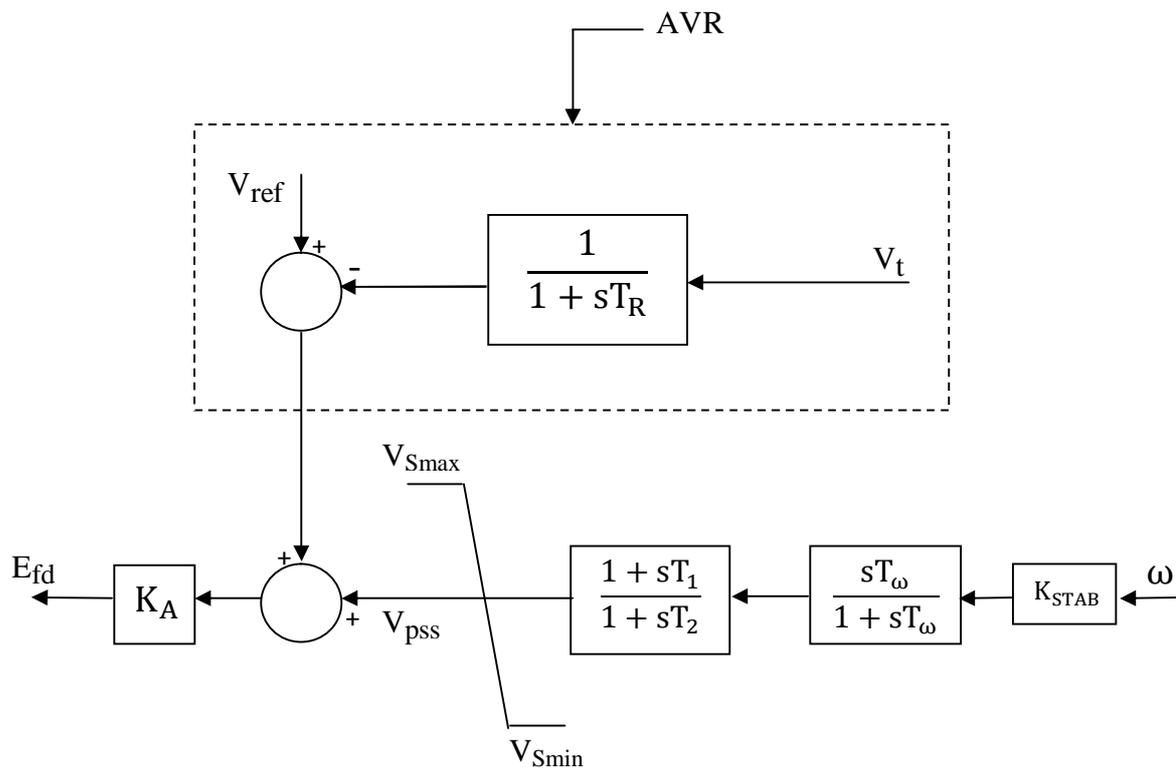
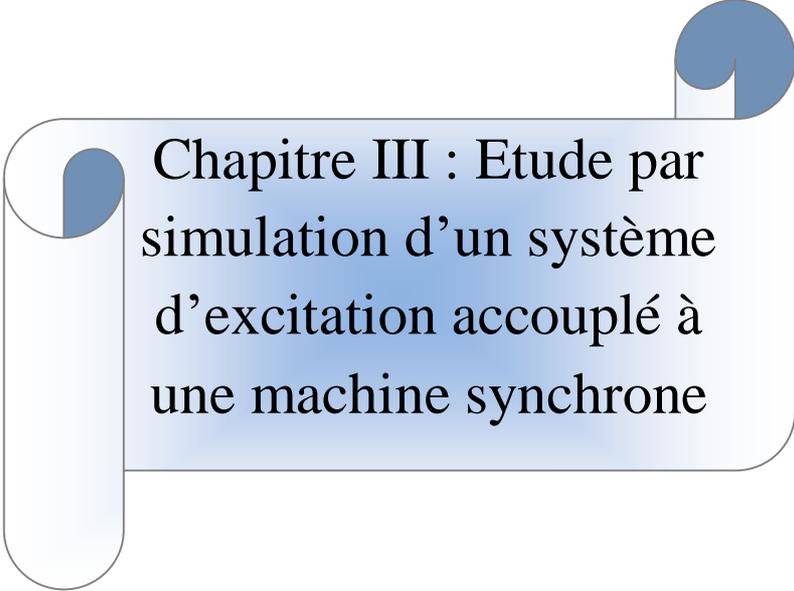


Figure II.9 : Combinaison PSS et AVR

Conclusion :

L'ensemble du système de contrôle d'excitation (AVR et PSS) doit assurer la stabilité transitoire et quelque soit le signal d'entrée, la fonction de transfert du PSS doit compenser les caractéristiques de phase du système d'excitation, des parties électriques du générateur et des autres parties électriques du système.

A decorative graphic of a scroll with a blue gradient background and white borders. The scroll is unrolled in the middle, revealing the chapter title. The top and bottom edges of the scroll are curled up.

Chapitre III : Etude par simulation d'un système d'excitation accouplé à une machine synchrone

III-1-Introduction :

Afin d'illustrer le rôle et l'intérêt d'un système d'excitation dans le réglage de la tension, la puissance réactive et la stabilité de la machine synchrone, nous nous proposons d'étudier un système de couplage excitation-machine synchrone alimentant une charge variable dans le temps.

Dans notre système, on utilisera pour l'excitation de la machine synchrone un système statique dit "à diodes tournantes".

L'excitation de l'alternateur principal est assurée par un alternateur intermédiaire auquel on adjoint un redresseur à diodes.

III-2-Description du système d'excitation :

L'alternateur consiste en une machine synchrone principale munie d'un système d'excitation constitué d'une petite machine synchrone connectée sur la même ligne d'arbre.

Le courant continu est obtenu par un pont à diodes tournantes montées sur la même ligne d'arbre.

La machine synchrone entraînée par un moteur Diesel a les caractéristiques suivantes :

2MVA, 400V, 50Hz, 1500tr /mn.

L'excitateur est une petite machine synchrone dont les valeurs nominales :

8,1KVA, 400V, 50Hz, 1500tr /mn.

- un transformateur 400V/12V utilisé pour adapter la tension de sortie de 400V de l'excitateur au redresseur.
- un pont redresseur à diodes dont la sortie est connectée directement à la machine synchrone.
- un sous-système est utilisé pour mesurer la tension d'excitation de la machine synchrone.

- un régulateur de tension (de type PI) assurant la régulation de la tension en contrôlant la tension d'excitation de l'excitateur. Ceci est réalisé en comparant la tension mesurée (séquence positive de la tension) à une référence égale à 1pu.
- un moteur Diesel et un régulateur de vitesse qu'on connecte à l'entrée Pm de la machine synchrone. Le moteur Diesel doit fournir la puissance mécanique totale exigée par la machine synchrone et l'excitateur.
- un interrupteur triphasé qui permet de brancher une autre charge après 3 secondes du lancement de la simulation.

La simulation consiste à alimenter une charge purement résistive qui va varier dans le temps, pour mettre en évidence le rôle de l'excitation.

On alimente une charge de 500 KW pendant 3secondes ensuite, on branche une autre charge de 1000 KW pour voir le régime transitoire.

Grace à la réaction de l'excitation, le système doit revenir à un état de fonctionnement stable.

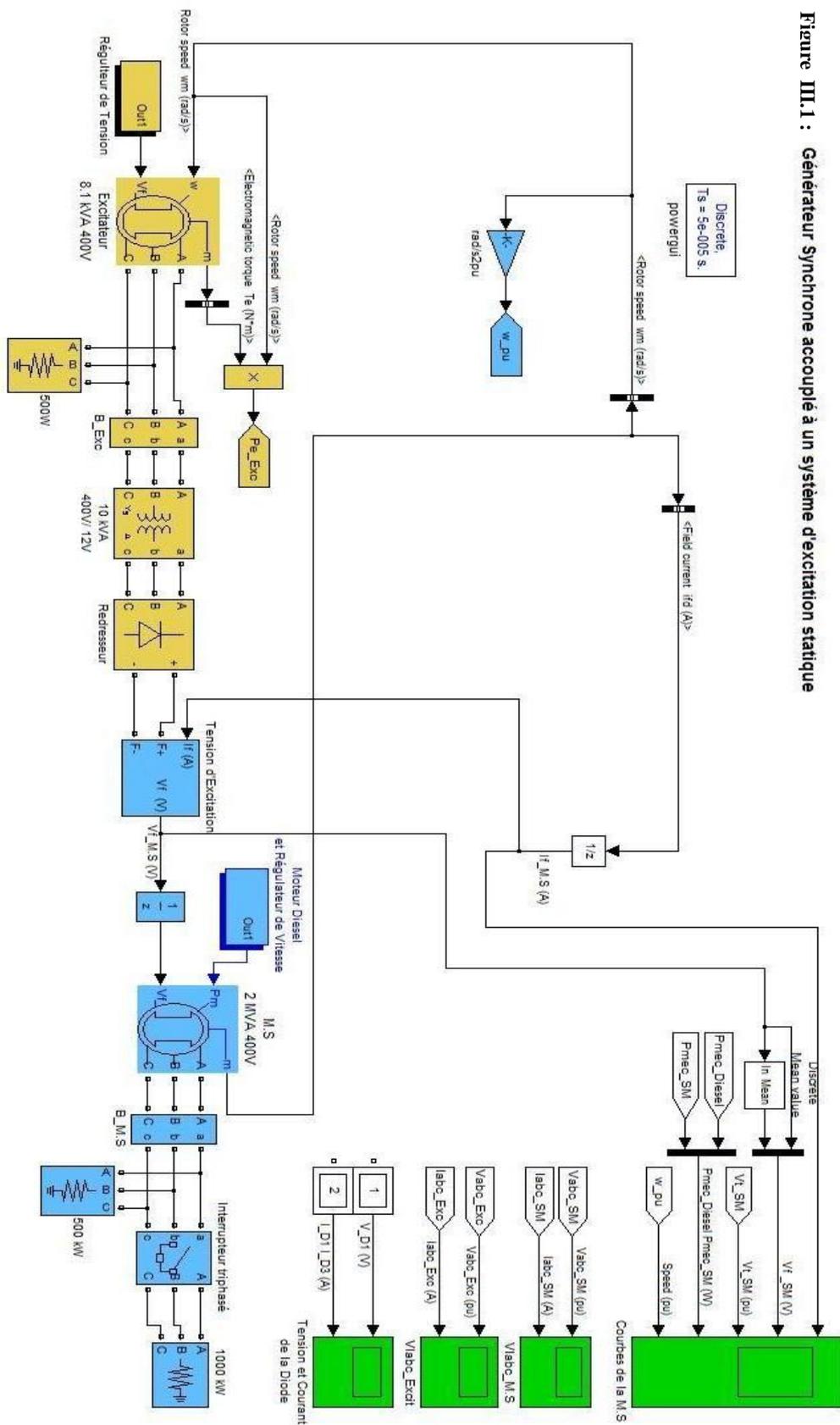


Figure III.1 : Générateur Synchrone accouplé à un système d'excitation statique

III-4-Paramètres des éléments du système :**1. Machine synchrone :**

Indices	Désignations	Unités	Valeurs
Rs	Résistance statorique	[Ω]	0.00076
LI	Inductance statorique	[H]	$1.273 \cdot 10^{-5}$
Lmd	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe directe	[H]	0.0005346
Lmq	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature	[H]	0.0003854
Rkd'	Résistance de l'enroulement porté sur l'axe directe en régime transitoire	[Ω]	0.0161
Lkd'	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe directe en régime transitoire	[H]	0.0005447
Rkq1'	Résistance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature en régime transitoire	[Ω]	0.002145
Lkq1'	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature en régime transitoire	[H]	$5.204 \cdot 10^{-5}$
J	Moment d'inertie de l'arbre du moteur	[Kg.m ²]	99.62
P	Nombre de paires de pôles	/	2
V _f	Tension d'excitation	[V]	10.45

2. Transformateur :

Enroulements	Type du couplage	Résistances des enroulements
Primaire	étoile	0.001 [pu]
Secondaire	triangle	0.001 [pu]

3. Excitateur :

Indices	Désignations	Unités	Valeurs
Rs	Résistance statorique	[Ω]	1.62
LI	Inductance statorique	[H]	0.004527
Lmd	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe directe	[H]	0.1086
Lmq	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature	[H]	0.05175
Rkd'	Résistance de l'enroulement porté sur l'axe directe en régime transitoire	[Ω]	3.142
Lkd'	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe directe en régime transitoire	[H]	0.007334
Rkq ₁	Résistance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature en régime transitoire	[Ω]	4.772
Lkq ₁	Inductance de l'enroulement porté sur l'axe en quadrature en régime transitoire	[H]	0.01015
V _f	Tension d'excitation	[V]	11.6354

III-5-Résultats de simulation :

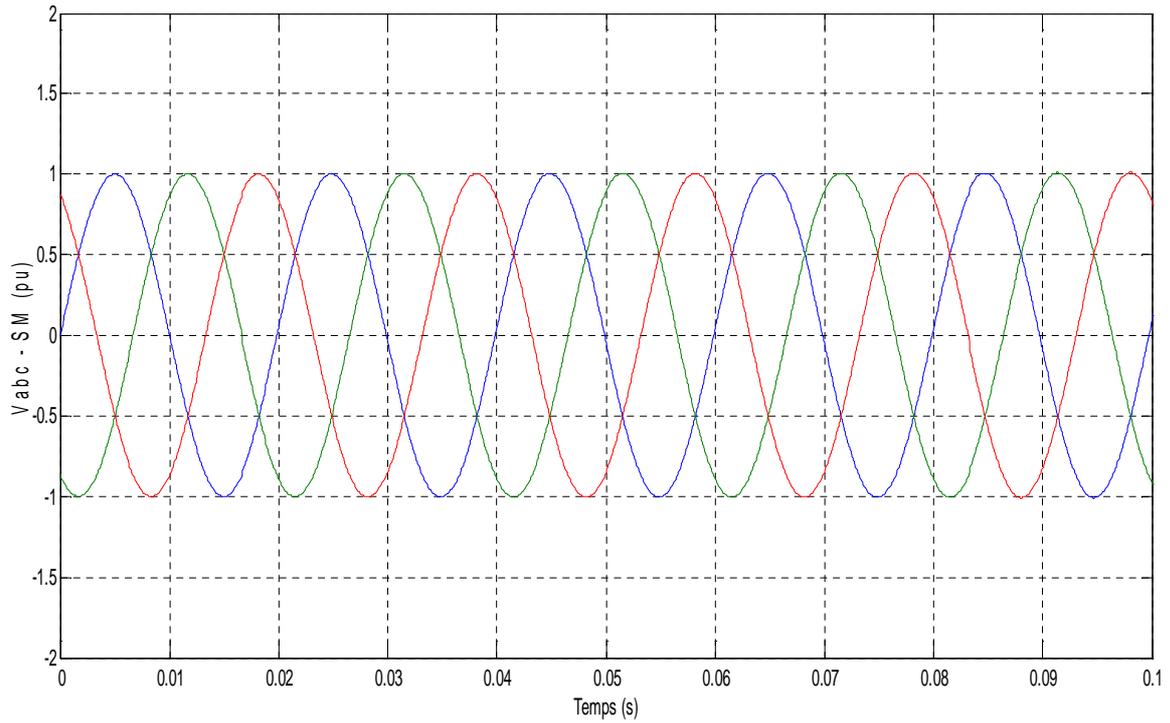
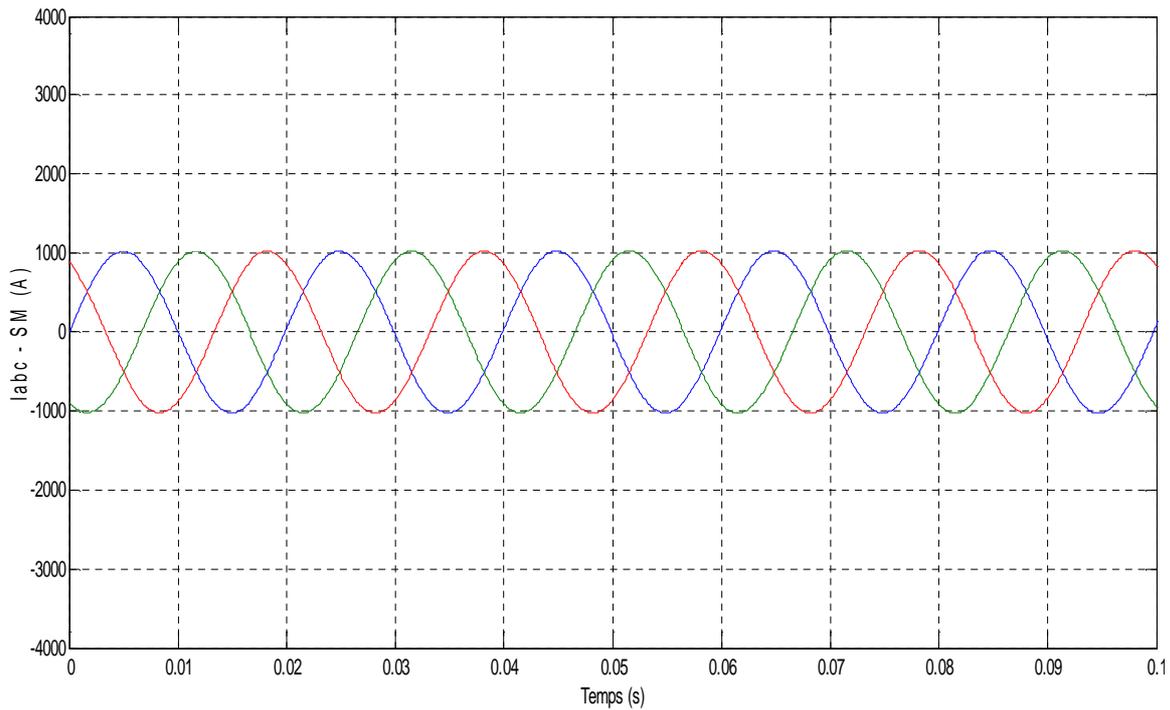


Figure III.2 : Tensions de la machine synchrone



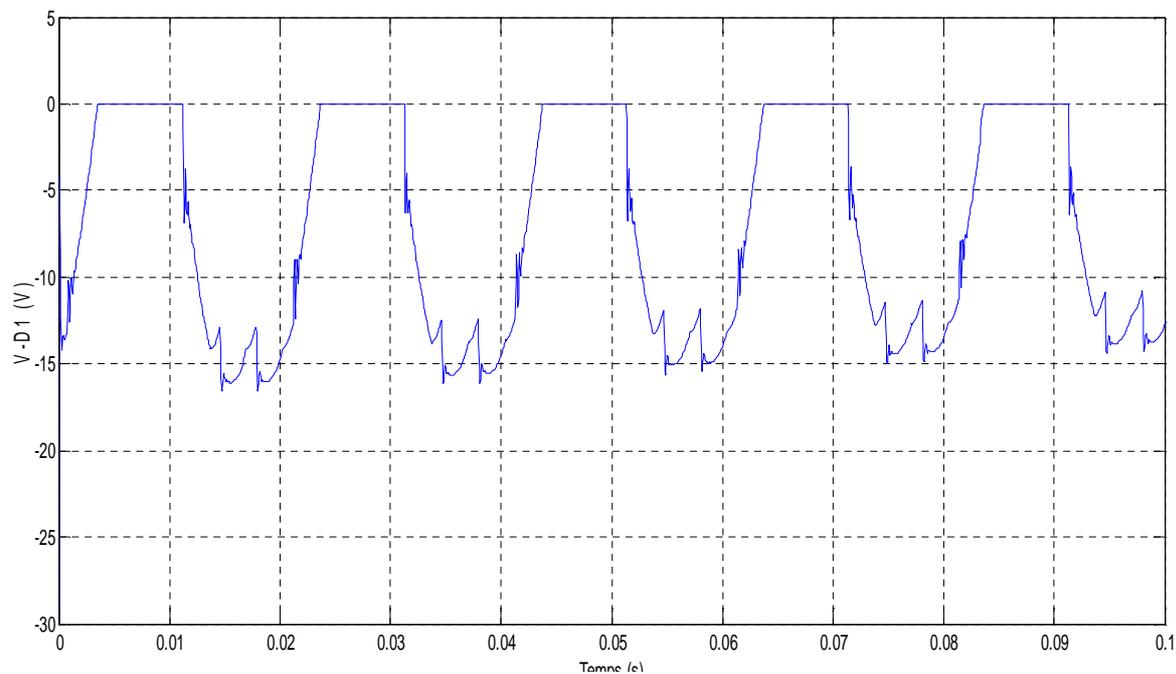


Figure III.4 : Tension de la diode

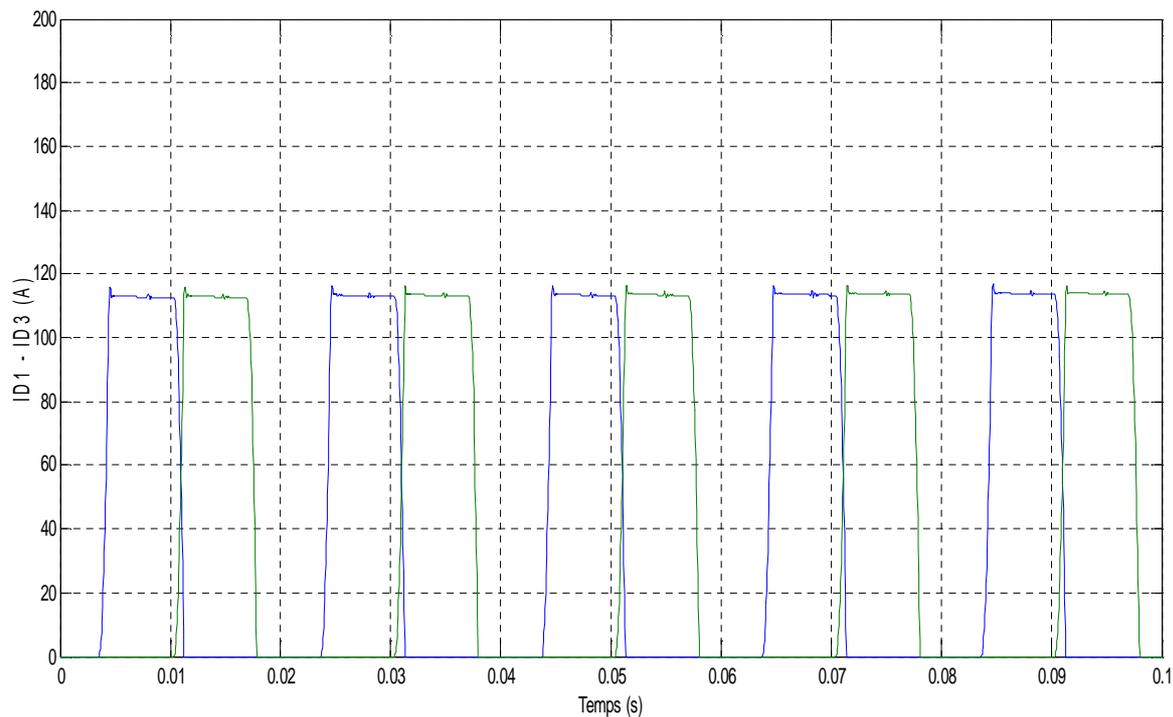


Figure III.5 : Courants des diodes

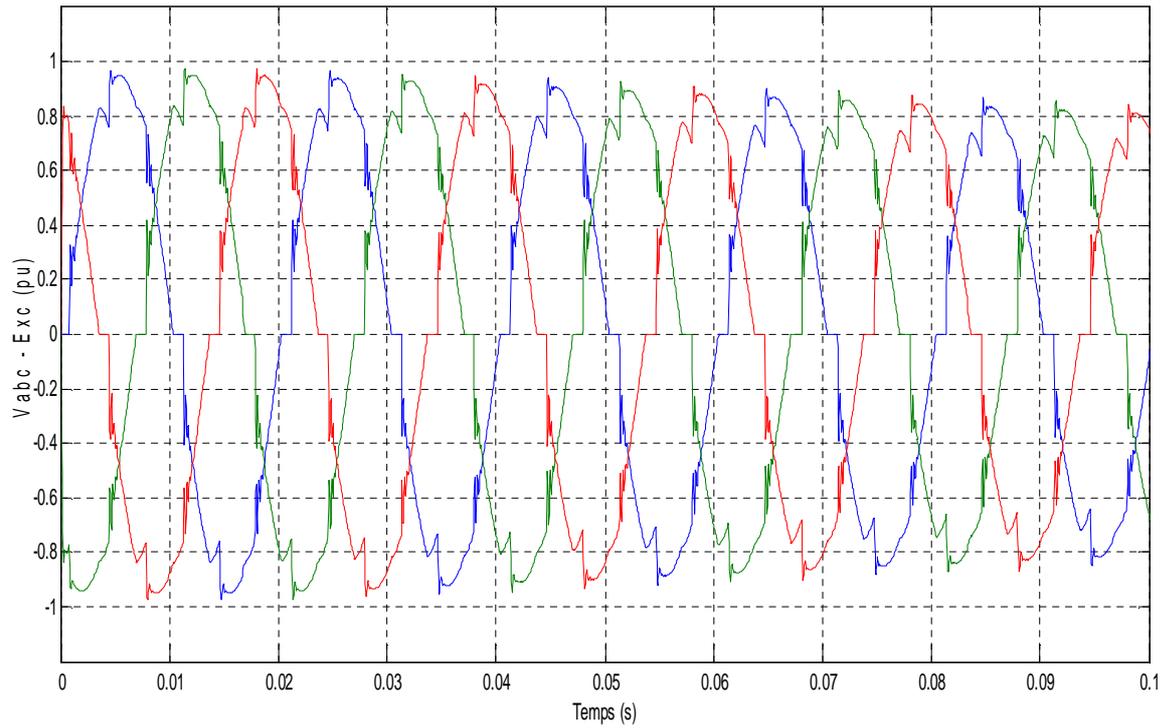


Figure III.6: Tensions de l'excitateur

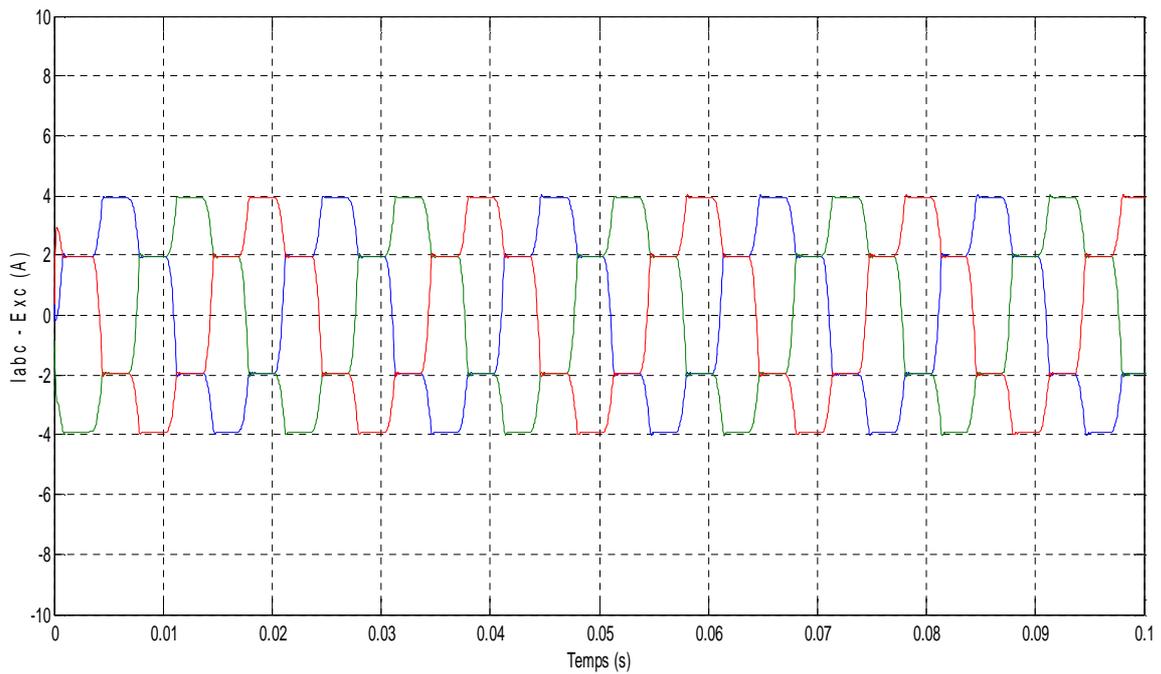


Figure III.7: Courants de l'excitateur

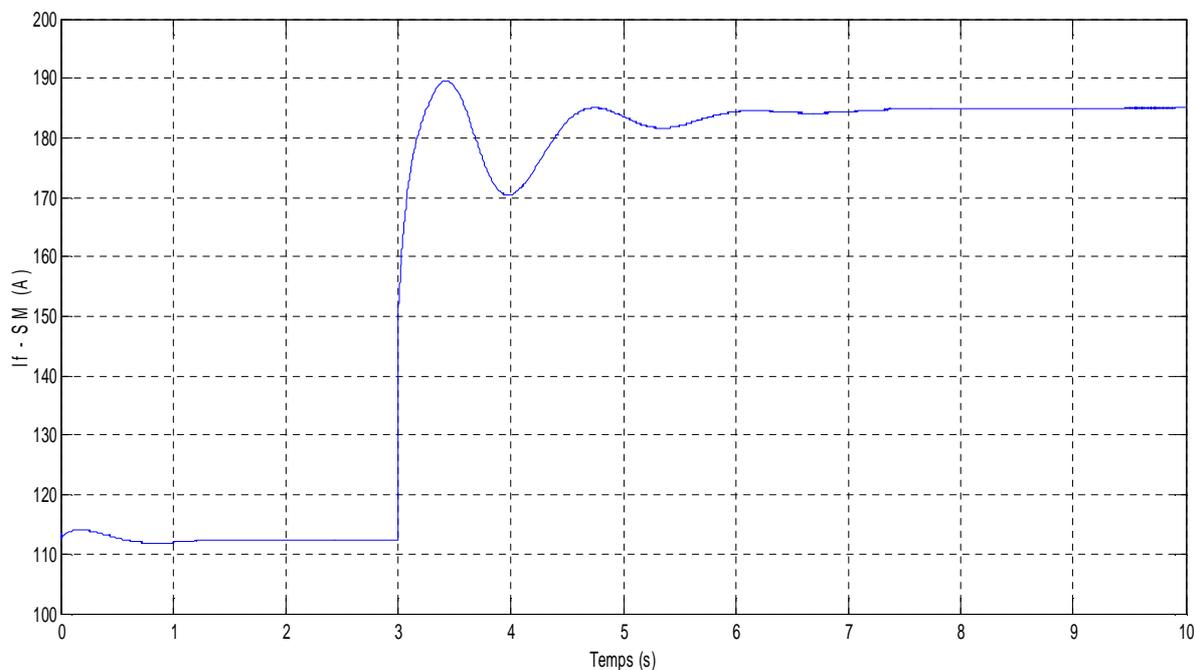


Figure III.8: Courant d'excitation de la machine synchrone

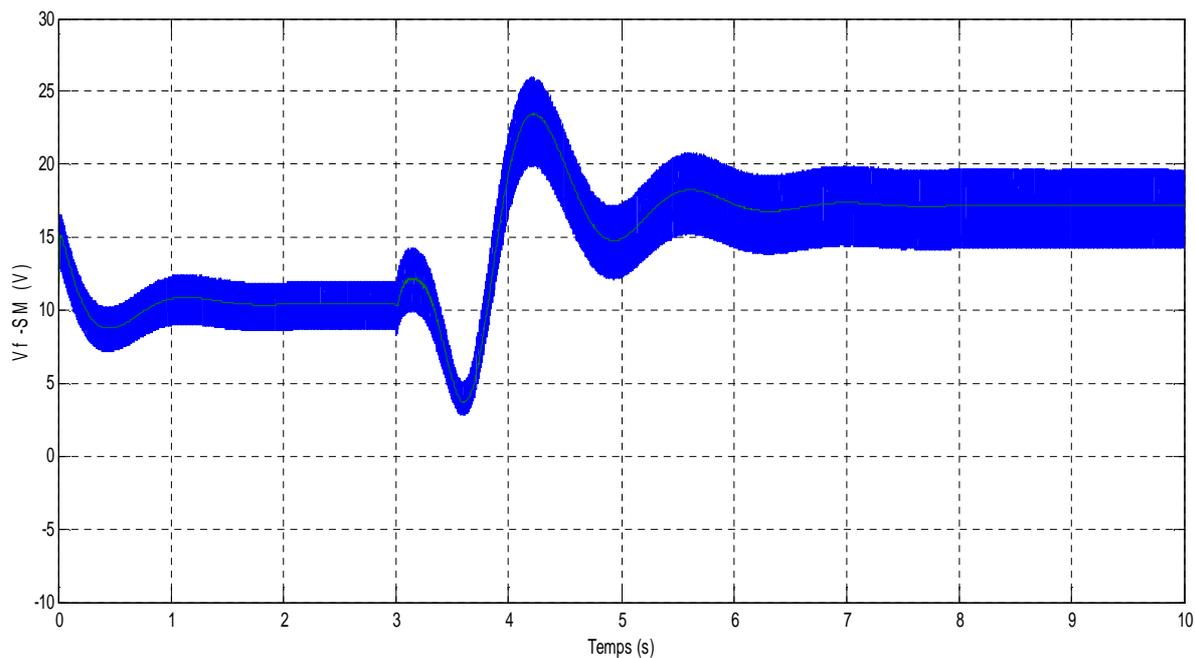
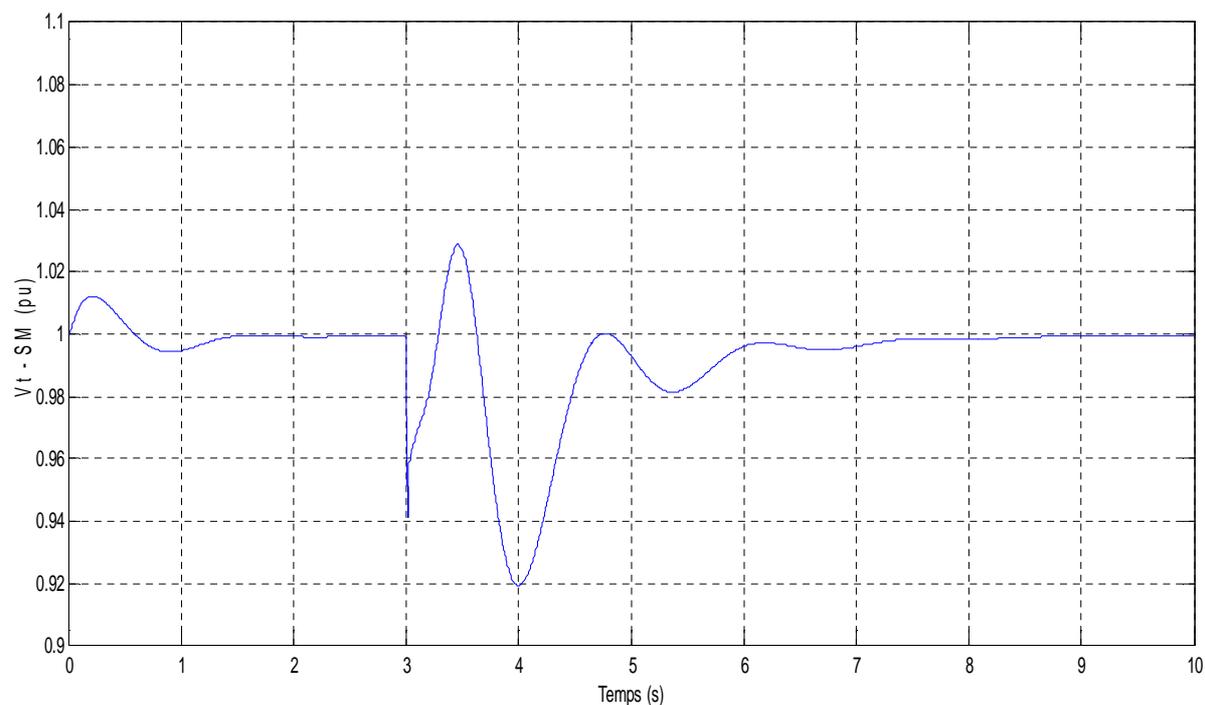
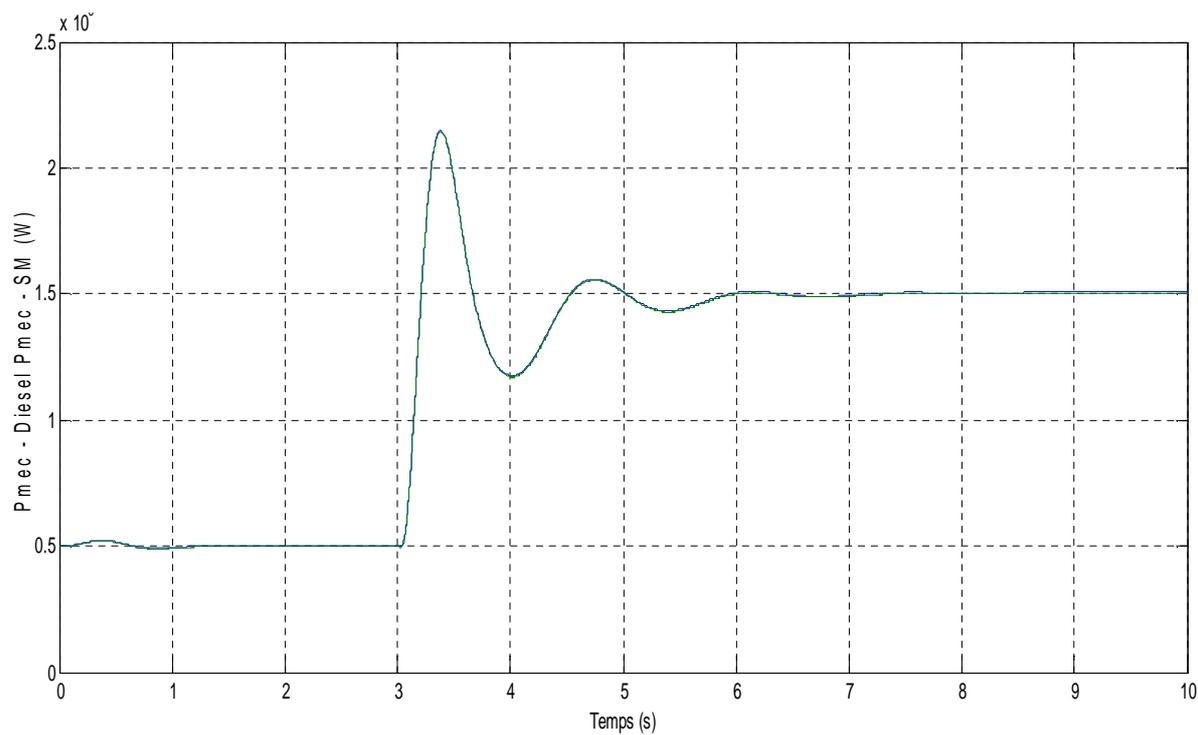


Figure III.9: Tension d'excitation de la machine synchrone

**Figure III.10: Tension de la machine synchrone****Figure III.11 : Puissance mécanique du moteur Diesel et de la machine synchrone**

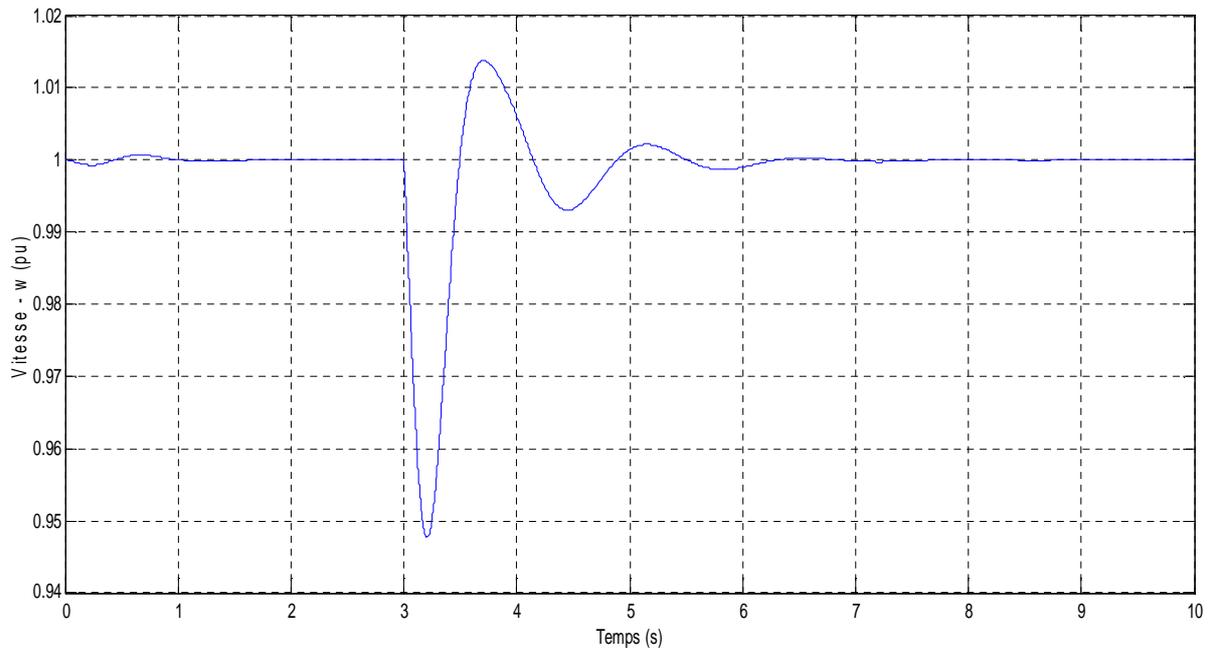


Figure III.12 : Vitesse de rotation

III-6-Interprétation des résultats :

Après simulation on remarque :

- Les tensions et les courants de la machine synchrone principale sont purement sinusoïdaux en raison de charges qui sont purement résistives.
- Les tensions et les courants des diodes sont sous formes de créneaux.
- La tension d'excitation contient des ondulations de fréquences de 300 Hz mais qui n'apparaissent pas dans le courant d'excitation en raison de la grande valeur de l'inductance totale du système (enroulements des machines-transformateur ...).
- De 0 à 3 secondes, la machine synchrone délivre 500KW (25% de la valeur nominale).

- A $t=3$ secondes, une charge supplémentaire de 1000KW est connectée en fermant l'interrupteur triphasé.
- Afin de garder la tension égale à 1pu, le courant d'excitation augmente de 112A à une valeur de 185A lorsque la charge supplémentaire est branché.
- La tension aux bornes de la machine synchrone principale atteint sa valeur nominale de 1pu après un régime transitoire de 3 secondes.
- Les deux dernières courbes montrent l'évolution des puissances mécanique du moteur Diesel et de la machine synchrone ; ainsi que l'évolution de la vitesse de la machine synchrone qui passe par un régime transitoire entre la troisième et la sixième secondes.
- Les régulateurs maintiennent aussi la vitesse égale à 1pu et la fréquence de la tension égale à 50Hz.

III-7-Conclusion :

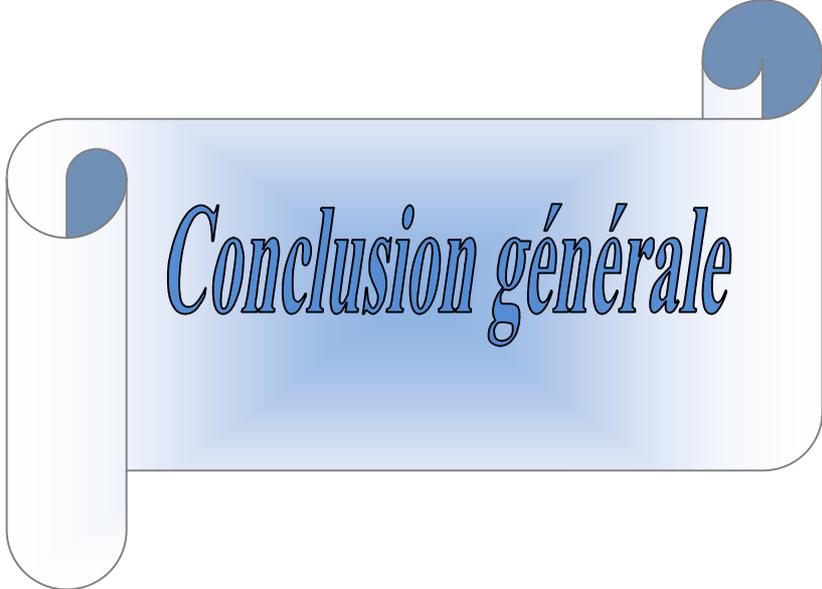
Le système choisi pour la simulation est un système alternateur-exciteur accouplé sur le même arbre que le rotor de la machine principale car ce système ne nécessite aucun contact glissant.

Ce schéma d'excitation par alternateur à diodes tournantes est couramment utilisé sur les groupes de très fortes puissances ; l'alimentation de l'enroulement du rotor est réalisée par liaison directe via un pont de diodes montées directement sur l'induit de l'excitateur.

En variant la charge, la tension ainsi que la vitesse diminuent, c'est pourquoi le courant d'excitation augmente pour les maintenir constantes.

L'excitation et son réglage assure donc la stabilité du fonctionnement de la machine synchrone et donc du système de puissance auquel elle est connectée.

Le mode d'excitation par diodes tournantes permet de s'affranchir d'inconvénients majeurs comme suppression des bagues et des balais, donc des pièces frottantes et leurs entretien, la faible puissance d'excitation à soutirer du réseau et la disposition des diodes facilitant leurs emplacements éventuels sans démontage des parties actives et sans outillage spécial.

A decorative graphic of a scroll with a blue gradient background and white borders. The scroll is unrolled in the center, with the text 'Conclusion générale' written in a blue, italicized serif font. The scroll has a dark blue circular element at the top right corner and a white circular element at the bottom left corner.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le rôle du système d'excitation est d'alimenter le rotor de l'alternateur avec un courant continu permettant de magnétiser la machine.

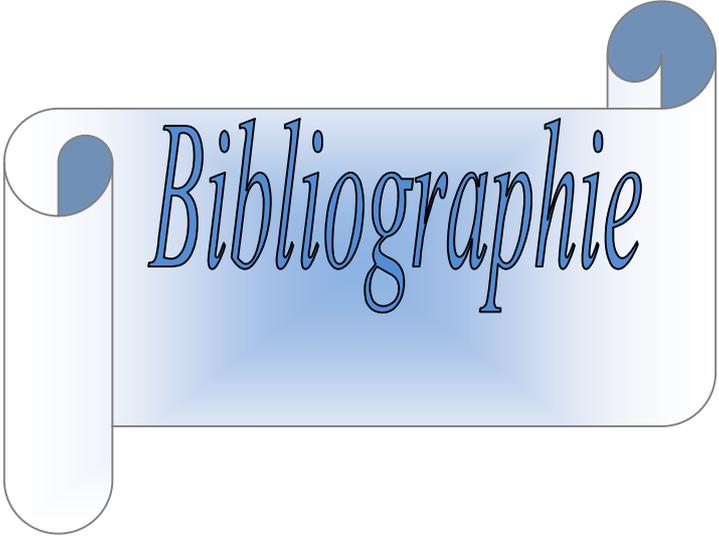
Dans l'étude de la stabilité des systèmes électriques, la simulation de l'influence des systèmes d'excitation est essentielle. Les modèles utilisés doivent correspondre aux performances des systèmes d'excitation surtout lors de l'apparition des perturbations sévères (stabilité transitoire) que dans l'analyse de la stabilité aux petites perturbations.

Les systèmes d'excitation incluent en général le régulateur automatique de tension, la source d'excitation est dans quelques cas le composant de la stabilisation PSS.

Du fait de leur faible inertie thermique, les redresseurs doivent être prévus en fonction de l'amplitude et de la durée des contraintes.

Les dispositifs d'excitation doivent être utilisés en adéquation avec la catégorie de la machine à exciter. L'étude des dispositifs d'excitation des machines nécessite de prendre en compte tous les aspects techniques de ces systèmes et l'analyse des différents composants qui les constituent, nous avons donc présenté les différents systèmes d'excitations et les modes de contrôle et de réglage avec une simulation d'un système à excitation statique.

Nous espérons que ce travail sera utile pour toute étude sur la machine synchrone et que la modélisation mathématique des systèmes d'excitation fera l'objet d'un projet futur.



Bibliographie

Références bibliographiques

[1]: P .WETZER,« Machines synchrones, Excitation »

D3545. Techniques de l'ingénieur.

[2]: P .KUNDUR, Power System Stability and Control.

The ERRI Power System Engineering Series, MC Graw-Hill-Inc 1994.

[3] : H.ALKHATIB ‘ ‘ étude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique ’ ’ .

Thèse d'état, soutenue le 06 décembre 2008. Université P.C.d'Aix Marseille III.

[4] : T.WILDI et G.SYBILLE, ‘ ‘ Electrotechnique ‘ ‘ édition de Boeck (4^{ème} édition).