



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologie  
Département d'automatique et électromécanique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** **Automatique**

**Spécialité :** *Automatique et systèmes*

Thème

**Par :** NAILI Fayçal

**Amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones**

**Soutenu publiquement 09/2020**

**Devant le jury :**

<b>M. BENCHAAABANE Achour</b>	MAA	Université de Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>D<sup>r</sup>. SADOUNI Radhwane</b>	MCB	Université de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>D<sup>r</sup>. FIHAKHIR Amine Mehdi</b>	MCB	Université de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>D<sup>r</sup>. CHOUABA Seif Eddine</b>	MCA	Université de Sétif	<b>Encadrant</b>
<b>M. LADJAL Boumediene</b>	MAA	Université de Ghardaïa	<b>Co-Encadrant</b>

**Année universitaire 2019/2020**

## *Remerciement*

*Le plus grand merci à dieu qui est le seul à guider dans le bon sens  
durant ma vie et qui a aidés à réaliser ce modeste travail*

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur Mr Seif-Eddine Chouaba  
pour sa disponibilité permanente tout au long de la réalisation de ce  
mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me  
consacrer et sans son aide, ce mémoire n'aurait pas vu le jour*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance  
qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail.*

*Je remercie tous les enseignants de la spécialité automatique et systèmes  
de l'Université de Ghardaïa*

*Mes remerciements vont aussi à toute ma famille et à tous mes amis pour  
leur aide et leur soutien.*

## *Dédicace*

*À ma mère*  
*À toute ma famille*  
*À ma femme et ma petite fille Meriem Chahd*  
*À tous mes amis*

### *Listes des tableaux*

Tableau 1: Structure d'excitation avec machine DC.....	7
Tableau 2: Structure d'excitation avec une machine AC et un redresseur statique. ....	8
Tableau 3: Structure d'excitation avec une machine AC et un redresseur tournant. ....	8
Tableau 4 : Structure d'excitation avec thyristors.....	9
Tableau 5: Excitation par auto-alimentation. ....	9
Tableau 6: Description du comportement et ajustement du processus. ....	25
Tableau 7: Matrice d'inférence pour la variation de la commande en fonction de (e) et (de). ....	25
Tableau 8. Les charges utilisées lors de l'impact et délestage. ....	29
Tableau 9: Paramètre du GS et de la ME (résistances en $\Omega$ , inductances en $mH$ ).....	29
Tableau 10: Résultats des tests de délestage de charge.....	38

### *Listes des figures*

Figure 1: Machine de Gramme. ....	5
Figure 2: Un générateur General Electric [Wikipédia]. ....	6
Figure 3: Système d'excitation d'un générateur synchrone. ....	6
Figure 4: Excitation SHUNT de la GP. ....	10
Figure 5: Excitation PMG de la GP. ....	10
Figure 6: Excitation AREP de la GP. ....	11
Figure 7: Influence de la variation de charge sur la tension composée générée aux bornes de l'alternateur. ....	12
Figure 8: Excitation conventionnelle d'une génératrice synchrone (CBE). ....	15
Figure 9: Excitation avancée d'une génératrice synchrone (FABE). ....	16
Figure 10: Schéma fonctionnel du système global sous forme d'espace d'états. ....	20
Figure 11: Commande floue du système de désexcitation. ....	20
Figure 12 : Structure de réglage par un contrôleur PD-Flou de la tension de dépassement d'un GS. ....	23
Figure 13: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8. ....	31
Figure 14: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8. ....	31
Figure 15: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.3. ....	32
Figure 16: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.3. ....	32
Figure 17: Tension efficace du générateur lors de l'impact d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.6. ....	32
Figure 18: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.6. ....	33
Figure 19: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 150% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8. ....	33
Figure 20: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 150% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8. ....	33
Figure 21: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge 100_0.8 pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas. ....	35
Figure 22: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge 100_0.3 pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas. ....	35
Figure 23: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge 100_0.6 pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas. ....	35
Figure 24: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge 150_0.8 pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas. ....	36
Figure 25: Dépassement de tension en (%) obtenu avec CBE et FABE par rapport à la valeur nominale (tension de référence). ....	37
Figure 26: Temps de réponse obtenu avec CBE et FABE à 0.5% de la valeur de consigne (tension de référence). ....	37

## Liste des abréviations

### Liste des Abréviations

Abréviations	Désignation
GP	Génératrice Principale
AE	Excitatrice Auxiliaire
ME	Machine Excitatrice
GS	Générateur Synchrone
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
PMG	Génératrice a Aimants Permanents
AREP	Auxiliary winding Regulation Excitation Principle
PID	Proportionnel, Intégral, Dérivé
CC	Courant Continu
ABE	Advanced Brushless Excitation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOV	Varistance Oxyde Métallique
MSIB	Machine Synchrone Inversée Bobiné
PD3	Pont Redressement de Diode Triphasé
CBE	Conventionnel Brushless Excitation
FABE	Fuzzy Advanced Brushless Excitation
ZnO	Oxydes de zinc
SIF	Système Inférence Floue

### Liste des symboles

$R_e$	La résistance de l'inducteur de la ME ( $\Omega$ )
$L_e$	L'inductance de l'inducteur de la ME ( $mH$ )
$R_s$	La résistance du stator de la GP ( $\Omega$ )
$L_f$	L'inductance de l'inducteur de la GP ( $mH$ )
$R_f$	Résistance de l'inducteur de la GP ( $\Omega$ )
$L_d$	L'inductance statorique directe de la GP ( $mH$ )
$L_q$	L'inductance statorique transversale de la GP ( $mH$ )
$R_D$	Résistance directe des amortisseurs de la GP ( $\Omega$ )
$R_Q$	Résistance transversale des amortisseurs de la GP ( $\Omega$ )
$L_D$	L'inductance directe des amortisseurs de la GP ( $mH$ )
$L_Q$	L'inductance transversale des amortisseurs de la GP ( $mH$ )
$M_{sf}$	L'inductance mutuelle entre la roue polaire et l'enroulement statorique de l'axe d ( $mH$ )
$M_{fD}$	L'inductance mutuelle entre la roue polaire et l'enroulement amortisseur de l'axe d ( $mH$ )
$M_{sD}$	L'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et les enroulements d'amortisseur selon l'axes d(direct) ( $mH$ )

## Liste des abréviations

$M_{sQ}$	L'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et les enroulements d'amortisseur selon l'axe q(transversal)
$\omega_{ep}$	La vitesse angulaire électrique de la GP
$\omega_{ee}$	La vitesse angulaire électrique de la ME
$C_1$	Condensateur virtuel triphasé ajouté à la borne du GS
$i_{d1}$	Courant de charge dans le repère d (A)
$i_{q1}$	Courant de charge dans le repère q (A)
$v_{exc}$	La tension d'excitation de la ME (V)
$i_{exc}$	Le courant d'excitation de la ME (A)
$v_{dp}$	La tension du générateur dans le repère d (V)
$v_{qp}$	La tension du générateur dans le repère q (V)
$i_{dp}$	Le courant du générateur dans le repère d (A)
$i_{qp}$	Le courant du générateur dans le repère q (A)
$i_D$	Le courant direct des amortisseurs (A)
$i_Q$	Le courant transversal des amortisseurs (A)
$i_f$	Le courant de la roue polaire de la GP (A)
$v_{Rd}$	La tension aux bornes de la résistance variable (V)
$R_d$	La résistance variable ( $\Omega$ )
$K_P$	Gain de l'action proportionnel
$K_D$	Gain de l'action dérivative
$U_{eff}$	La tension efficace (V)
$\Delta U_i$	La chute de tension (V)
$\Delta U_d$	Le dépassement de tension (V)
$\Delta t_i$	Le temps de réponse de la chute de tension (ms)
$\Delta t_d$	Le temps de réponse de dépassement de tension (ms)
$v_{ref}$	Tension de protection (V)
$I_{ref}$	Courant de référence (A)
$\tau$	Constante de temps du filtre passe-bas (ms)
$U_{mes}$	Tension mesurée de l'alternateur (V)
$U1_{ref}$	Tension de référence du contrôleur $H_\infty$ (V)
$U2_{ref}$	Tension de référence du contrôleur flou (V)
$e$	Erreur
$de/dt$	Dérivé d'erreur
$U$	Commande

### *Table des matières*

Remerciement .....	i
Dédicace.....	ii
Listes des tableaux .....	iii
Listes des figures.....	iv
Table des matières.....	vii
Introduction générale .....	1
Chapitre I.....	3
Généralités sur les génératrices synchrones et leurs systèmes d'excitations .....	3
1 Génératrices synchrones.....	4
1.1 Bref historique sur les machines électriques .....	5
1.2 Quelques applications des générateurs synchrones.....	5
2 Les systèmes d'excitation des générateurs synchrones.....	6
2.1 Généralités.....	6
2.2 Sources d'énergie pour l'excitatrice.....	10
2.2.1 SHUNT .....	10
2.2.2 PMG (Permanent Magnet Generator) .....	10
2.2.3 AREP (Auxiliary winding Regulation Excitation Principle).....	11
2.3 Commande de la structure d'excitation.....	11
3 Problématique de notre travail de recherche.....	11
4 Conclusion .....	13
Chapitre II.....	14
Commande floue pour la structure de désexcitation .....	14
1 Rappel sur la structure d'excitation classique (Conventional Brushless Excitation (CBE)) .....	15
2 Système d'excitation avancé (Fuzzy Advanced Brushless Excitation (FABE)) .....	16
2.1 Système d'excitation positive.....	16
2.1.1 Conception du contrôleur $H_\infty$ :.....	17
2.2 Système de désexcitation.....	20
2.2.1 Conception du contrôleur d'excitation négative.....	21
2.2.1.1 La 1ère étape.....	22
2.2.1.2 La 2ème étape : Choix des entrées et sorties .....	23
2.2.1.3 La 3ème étape .....	23
2.2.1.4 La 4ème étape Définition du comportement du contrôleur flou.....	24
2.2.1.5 La 5ème étape Défuzzification :.....	26
2.2.2 Réglage.....	26
2.2.3 Résistance non linéaire.....	27
3 Conclusion .....	27

## **Table des matières**

---

Chapitre III .....	28
Analyse & Validation des résultats .....	28
1 Mesure des performances des systèmes d'excitation.....	29
2 Charges utilisées et paramètres du GS et de la ME .....	29
3 Modèle de simulation et commande floue .....	30
4 Impact et délestage des différentes charges .....	30
4.1 Charge nominale $100_{0,8}$ .....	31
4.2 Charge $100_{0,3}$ .....	32
4.3 Charge $100_{0,6}$ .....	32
4.4 Charge $150_{0,8}$ .....	33
5 Effet du temps de réponse du système de transmission du signal de commande .....	34
5.1 Charge nominale $100_{0,8}$ .....	35
5.2 Charge $100_{0,3}$ .....	35
5.3 Charge $100_{0,6}$ .....	35
5.4 Charge $150_{0,8}$ .....	36
6 Comparaison qualitative et quantitative entre les deux systèmes d'excitation .....	36
7 Conclusion .....	39
Conclusion générale .....	40
Références bibliographiques .....	ix
Résumé.....	x

# *Introduction générale*

### ***Introduction générale***

Depuis plusieurs décennies, les industriels portent un intérêt constant pour les machines en général et pour la génératrice synchrone en particulier dont le rôle est de produire de l'électricité à partir de l'énergie mécanique. Cette machine, au-delà de ses utilisations classiques dans des domaines tels que la traction ferroviaire, la production dans les centrales nucléaires, hydrauliques et les groupes électrogènes, est de plus en plus utilisée dans les systèmes embarqués tels que les navires à propulsion électrique.

Depuis de nombreuses années, les électrotechniciens se sont intéressés à l'amélioration des performances des machines électriques. C'est ainsi que des travaux importants ont été réalisés sur la structure des machines afin de les optimiser. Grâce à ces optimisations, les quantités de cuivre utilisées pour le bobinage des machines sont de plus en plus réduites conduisant à des tailles de machine plus faibles en restant performantes.

Bien que ces améliorations soient importantes et apportent de bonnes réponses aux préoccupations des industriels, notons qu'avec les structures d'excitation classiques combinées avec les systèmes de régulations traditionnels, certains phénomènes indésirables peuvent survenir lors du fonctionnement des machines. À titre d'exemple, lors du délestage, le pont à diodes rend impossible l'application de tensions négatives sur l'inducteur pour accélérer la réduction du courant d'excitation et provoque par conséquent une surtension. Par ailleurs, compte tenu du type d'excitation qui est utilisée, la qualité des signaux présente des taux de distorsion assez importants.

L'objet de ce travail de Master 2 est de proposer des voies d'amélioration pour les génératrices synchrones. En effet, nous utiliserons une structure d'excitation classique combinée à un système de désexcitation avancé pour les machines synchrones sans balais. Cette combinaison a pour objectif d'assurer la capacité d'obtenir des tensions négatives et éviter tout phénomène de roue libre, observé avec les structures classiques. Afin d'optimiser davantage les performances dues à notre approche, une loi de commande floue plus évoluée, moderne et robuste sera utilisée. L'objectif recherché avec cette loi, est d'obtenir le minimum d'influence des perturbations de charge sur la tension délivrée par la Génératrice Principale (GP), lors du délestage.

Ce mémoire est devisé en trois chapitres :

## **Introduction générale**

---

Dans le premier chapitre, une présentation des machines synchrones est donnée ainsi que les différentes structures d'excitation utilisées actuellement.

Dans le deuxième chapitre, les deux structures utilisées dans ce travail (classique et avancée) de la GP sont présentés en détaillant leurs composants. Autrement, une nouvelle loi de commande floue capable de contrôler l'enroulement principal de champ principal de la GP avec des tensions négatives est développée. L'approche de commande floue est décrite de façon théorique et ensuite appliquée.

Le troisième chapitre est réservé à l'application du contrôleur flou développé dans ce travail. Des validations par simulation sous Matlab/Simulink seront présentées et comparées avec une machine industrielle équipée d'une structure d'excitation classique en vue de faire ressortir les avantages de la nouvelle structure d'excitation combinée à la loi de commande floue.

Finalement, une conclusion générale, avec quelques perspectives, clôturera ce rapport.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les*  
*génératrices synchrones*  
*et leurs systèmes*  
*d'excitations*

---

## *Chapitre I*

# *Généralités sur les génératrices synchrones et leurs systèmes d'excitations*

---

**A** fin de mieux comprendre le cadre de notre travail, il nous a semblé nécessaire de présenter quelques généralités sur des machines synchrones est donnée ainsi que les différentes structures d'excitation utilisées actuellement. Dans ce chapitre et dans un premier temps, nous introduisons notre travail par une présentation de quelques généralités sur les génératrices synchrones. Dans un deuxième temps, nous présenterons quelques évolutions de la structure d'excitation et du régulateur de tension. Enfin, on terminera ce chapitre par une description de la problématique de notre travail de recherche.

**1 Génératrices synchrones**

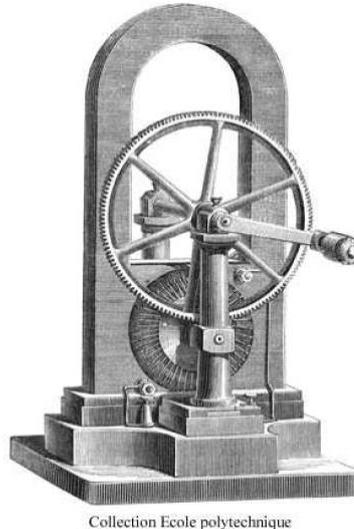
Les génératrices synchrones sont les principaux générateurs de l'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs électromécaniques au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique dans une gamme de puissance très importante. La génératrice synchrone est une machine composée principalement de deux parties, à savoir un inducteur généralement au rotor et d'un induit au stator. Le bobinage inducteur, grâce à une alimentation appropriée, permet de générer un champ électromagnétique ayant pour conséquence d'induire dans le bobinage induit, une tension triphasée récupérable via les bornes de la machine. Plusieurs technologies d'alimentation de cet inducteur ont été développées depuis plusieurs années afin d'améliorer les performances des machines et le choix de l'une ou de l'autre des technologies dépend généralement de l'application que l'on souhaite faire des machines et surtout des contraintes de fonctionnement de ces dernières. La particularité de la génératrice synchrone, comme son nom l'indique, est de produire des tensions de sortie dont la fréquence est rigoureusement liée à celle du champ tournant (champ inducteur). Ainsi, il devient aisé de fixer cette fréquence grâce à une régulation adéquate de la vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement de la génératrice. [1]

Les génératrices synchrones peuvent être à pôles saillants ou à pôles lisses. Le nombre de pôles est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Dans les centrales électriques thermiques (nucléaires ou classiques), une turbine à vapeur ou une turbine à gaz tourne à grande vitesse à 3000 ou 1500 tr/min sur les réseaux à 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent 2 ou 4 pôles. Dans les centrales hydrauliques, les turbines tournent plus lentement. Comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor. Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à laisser l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis.

Les alternateurs sont encore utilisés en tant que générateur d'énergie électrique autonome (groupes électrogènes). La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. Les grands groupes électrogènes utilisent généralement un moteur Diesel à faible vitesse de rotation. Dans ce cas, le rotor de l'alternateur ressemble beaucoup à celui d'un alternateur hydraulique, avec un nombre élevé de pôles, un grand diamètre et un grand moment d'inertie absorbant les variations de vitesse de rotation de l'arbre du moteur Diesel [2].

**1.1 Bref historique sur les machines électriques**

En 1869, le belge Zénobe Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme dont une photo est donnée par figure 1.



*Figure 1: Machine de Gramme.*

La machine synchrone est inventée par Nikola Tesla. Son concept figure dans un dépôt de sept brevets du 1er mai 1888 où il en décrit plusieurs variantes ainsi que le principe du courant alternatif biphasé et triphasé et leur distribution. Tesla aurait développé cette idée de machine électrique quand il était étudiant à l'École polytechnique de Graz (1875-1876).

L'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889 grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Doliwo-Doborwolski. Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla.

Depuis la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques. Au-delà de leur conception qui est quasi standardisée, il convient de savoir dans quelle mesure ces machines peuvent être exploitées au meilleur de leurs performances. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance du système mais surtout par une élaboration de lois de commande adaptées

**1.2 Quelques applications des générateurs synchrones**

Parmi les applications des alternateurs à charge séparée (sans couplage au réseau) on cite : les zones non couplées à un réseau d'énergie (îles, déserts, sites, etc.) ; les applications « secours »

(hôpitaux, industries, aéroports, centres informatiques, etc.) ; les applications embarquées (navires, avions, véhicules électriques et hybrides, etc.).



Figure 2: Un générateur General Electric [Wikipédia].

## 2 Les systèmes d'excitation des générateurs synchrones

### 2.1 Généralités

Un générateur synchrone (alternateur) est constitué de la génératrice principale (GP) et d'un système d'excitation (figure 3). Ce dernier est composé de la structure d'excitation nécessaire pour l'alimentation de l'inducteur de la GP et du régulateur de tension. Une source de puissance est toujours nécessaire pour l'alimentation de la structure d'excitation GP.

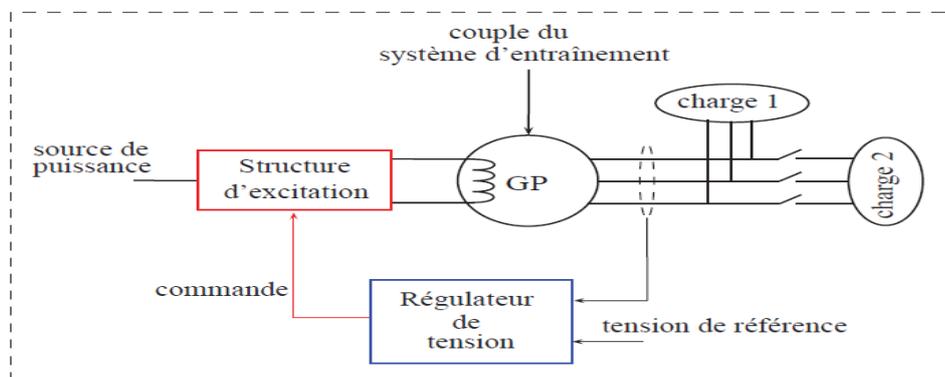


Figure 3: Système d'excitation d'un générateur synchrone.

Pour produire de l'énergie électrique, la génératrice synchrone a besoin d'un champ magnétique tournant. Ce champ est créé grâce à un courant continu dans le bobinage du rotor dans le cas d'une machine à rotor bobiné et par les aimants dans le cas de machine à aimants permanents. On parle alors d'excitation de la machine. Le système d'excitation est constitué de la structure d'excitation de l'alternateur et du régulateur de tension.

Un alternateur doit fournir une tension constante. En plus, la variation de la charge doit avoir le minimum d'influence sur la tension générée. Certaines applications nécessitent une haute qualité de

fourniture d'énergie (hôpitaux par exemple). Pour cela, l'alternateur est toujours équipé d'un système d'excitation qui a pour rôle de réguler la tension de sortie et de rejeter les perturbations liées à la variation de la charge de l'alternateur.

Parmi les critères utilisés pour définir les différentes excitations des machines synchrones, les plus importants sont le mode de régulation et le mode de prélèvement de l'énergie servant à alimenter l'inducteur de la machine principale. De plus, le système d'excitation doit répondre aux exigences de plusieurs applications :

- Stabilité ;
- Régulation performante avec une réponse rapide ;
- Grande fiabilité ;
- Grande disponibilité ;
- Exigences d'entretien minimales ;
- Construction robuste.

Il existe différentes structures d'excitation qui peuvent être classées en trois catégories : ([2], [3])

- Les excitations utilisant une source extérieure continue,
- Celles réalisant une auto excitation de la machine par prélèvement d'énergie sur les bornes de cette dernière,
- Celles utilisant un autre alternateur monté sur le même arbre que l'alternateur principal combiné à un redresseur.

*Tableau 1: Structure d'excitation avec machine DC.*

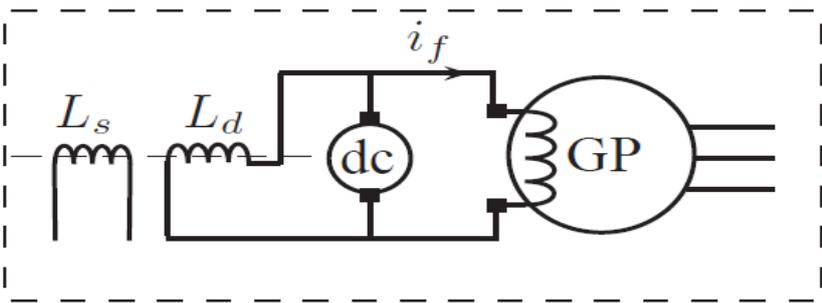
<i>Structure d'excitation avec machine dc.</i>	
	
<b>Principe</b>	La figure montre le principe général de l'excitation de la GP avec une machine dc.
<b>Caractéristiques</b>	La transmission de la puissance de la machine dc vers l'inducteur de la GP nécessite l'utilisation de bagues et de balais (sur la machine dc et sur la GP).
<b>Avantages</b>	Système simple, alimentation externe requise de faible puissance
<b>Inconvénients</b>	Maintenance régulière, solution coûteuse, contrôle indirect, étincelles,
<b>Applications</b>	Cette solution a été utilisée par les sociétés General Electric (GE) et Westinghouse.

Tableau 2: Structure d'excitation avec une machine AC et un redresseur statique.

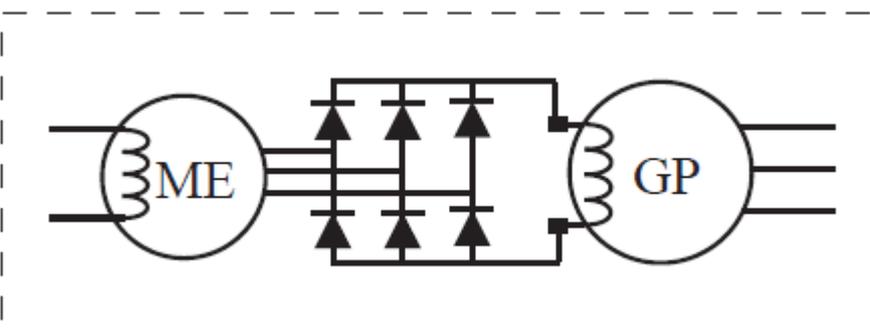
<i>ME à courant alternatif suivie d'un pont de diodes</i>	
	
<b>Principe</b>	Structure d'excitation à base d'une machine à courant alternatif suivie d'un pont de diodes statique
<b>Caractéristiques</b>	Un niveau de puissance qui convient pour l'excitation des plus grands générateurs. La ME est une machine synchrone à rotor bobiné. On note que le transfert de la puissance vers la roue polaire s'effectue par l'intermédiaire de bagues et de balais sur la GP
<b>Avantages</b>	Construction robuste, Excitation rapide, Système simple
<b>Inconvénients</b>	Maintenance régulière, Contrôle indirect, étincelles
<b>Applications</b>	Cette structure a été utilisée par GE Alterrex.

Tableau 3: Structure d'excitation avec une machine AC et un redresseur tournant.

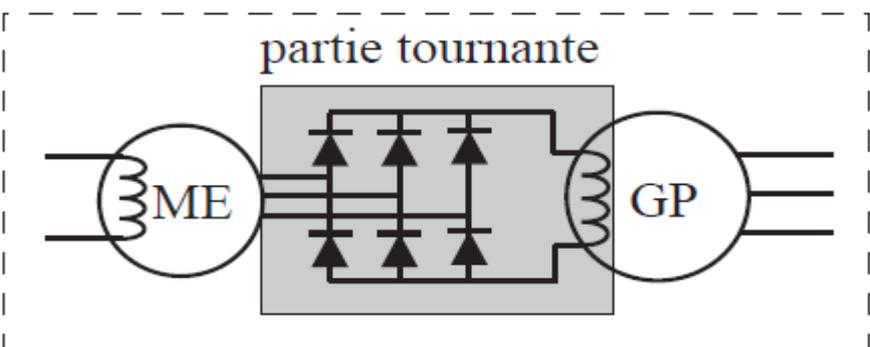
<i>Structure d'excitation avec une machine AC et un redresseur tournant.</i>	
	
<b>Principe</b>	Structure d'excitation à base d'une machine à courant alternatif suivie d'un pont de diodes rotatif (sans bagues ni balais)
<b>Caractéristiques</b>	La machine excitatrice est inversée et caractérisée par son inducteur fixe et son induit tournant. Les Générateurs de grande capacité.
<b>Avantages</b>	Pas de balais de charbon, faible coût de maintenance
<b>Inconvénients</b>	Excitation lente, contrôle indirect, pont de diodes ne permet pas l'excitation avec des tensions négatives.
<b>Applications</b>	Cette structure a été très utilisée dans les applications Aéronautiques

Tableau 4 : Structure d'excitation avec thyristors.

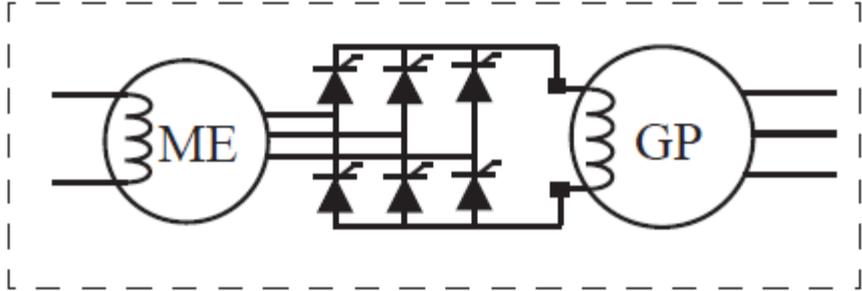
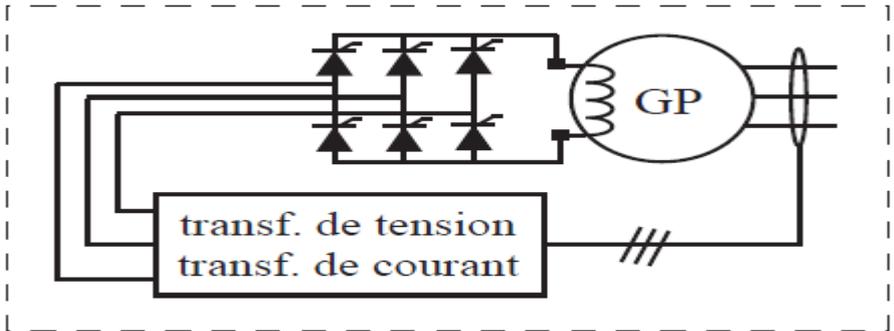
ME à courant alternatif suivie d'un pont à thyristors	
	
<b>Principe</b>	Structure d'excitation à base d'une machine à courant alternatif suivie d'un pont à thyristors (les diodes au silicium sont remplacées par des thyristors)
<b>Caractéristiques</b>	Il est possible de varier rapidement la tension de la roue polaire. En plus, cette dernière peut prendre des valeurs positives et négatives
<b>Avantages</b>	Déexcitation rapide, Pont à thyristors permet l'excitation avec des tensions négatives
<b>Inconvénients</b>	Des bagues et des balais sont souvent utilisés pour la transmission de la puissance vers la roue polaire, contrôle indirect
<b>Applications</b>	Cette structure est utilisée par plusieurs sociétés (Siemens, General Electric ...)

Tableau 5: Excitation par auto-alimentation.

Auto-alimentation	
	
<b>Principe</b>	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)
<b>Caractéristiques</b>	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).
<b>Avantages</b>	Système simple, Excitation rapide, Contrôle direct
<b>Inconvénients</b>	Maintenance régulière, Étincelles
<b>Applications</b>	ABB pour les applications marines

## 2.2 Sources d'énergie pour l'excitatrice

Il existe trois principales méthodes pour produire la puissance nécessaire à l'alimentation de la machine excitatrice ME :

### 2.2.1 SHUNT

La tension d'alimentation du régulateur de tension est prise en dérivation sur les bornes de sortie de la GP. Le régulateur de tension génère et régule le courant d'excitation en fonction de la tension de sortie de la GP. Le système SHUNT est simple de par sa conception et très adapté aux besoins basiques, plus l'ajout d'une seule machine sur l'arbre principal de la turbine GS. Par contre, il n'accepte pas de surcharges élevées et n'offre pas de capacité de court-circuit. Cette structure est utilisée dans les applications de secours basiques, télécom., etc.

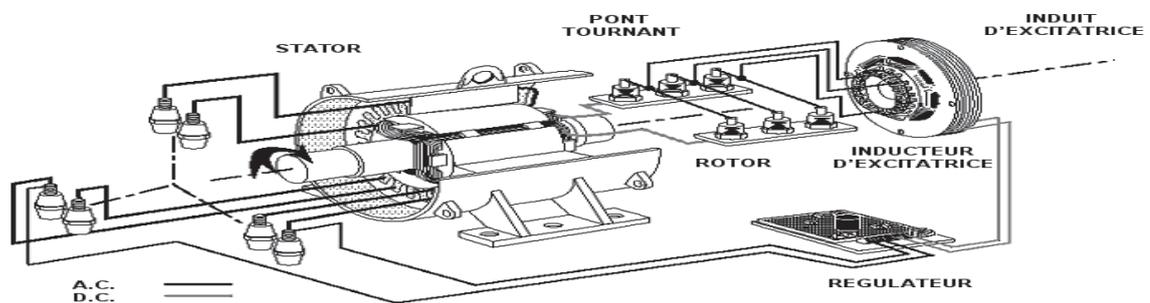


Figure 4: Excitation SHUNT de la GP

### 2.2.2 PMG (Permanent Magnet Generator)

À propos de l'excitation PMG, la tension d'alimentation du régulateur de tension est Générée par une génératrice a aimants permanents (PMG) montée sur l'arbre de l'alternateur. La PMG délivre une tension constante et indépendante de la charge de la GP. Le système PMG présente par conséquent une capacité de surcharge élevée (impact de charge Ou démarrage de moteurs électriques) et une capacité de court-circuit de 300% (le courant de court-circuit est égal au triple du courant nominal). Son amorçage est intrinsèque grâce aux aimants permanents.

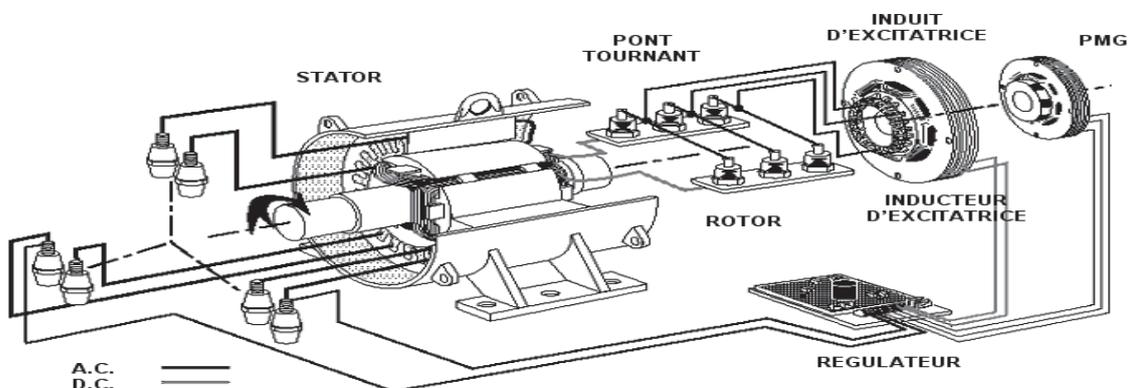


Figure 5: Excitation PMG de la GP.

### 2.2.3 AREP (Auxiliary winding Regulation Excitation Principle).

À propos de l'excitation AREP (brevet de la société Leroy Somer), le régulateur est alimenté par deux bobinages auxiliaires. La tension délivrée par le premier bobinage auxiliaire H1 est proportionnelle à la tension de sortie de la GP. La tension délivrée par le second bobinage auxiliaire H3 est proportionnelle au courant débité par l'alternateur en fonction de la charge appliquée. La tension composée résultante permet l'alimentation du régulateur. Le système AREP dote l'alternateur d'une capacité de surcharge élevée (impact de charge ou démarrage de moteurs électriques) et une capacité de court-circuit de 300%. L'alternateur avec excitation AREP a un encombrement moindre qu'avec une excitation PMG. Les structures PMG et AREP sont très utilisées dans la marine, l'industrie, la construction, les hôpitaux, les banques, etc.

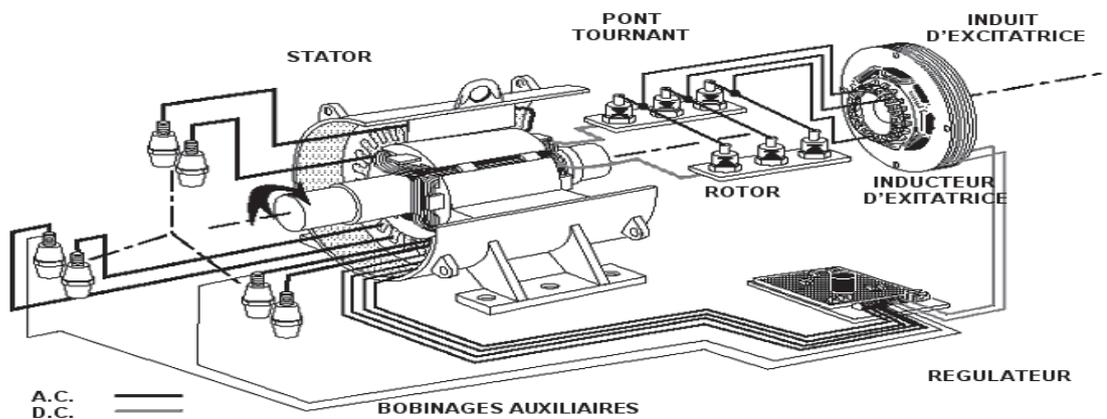


Figure 6: Excitation AREP de la GP.

### 2.3 Commande de la structure d'excitation

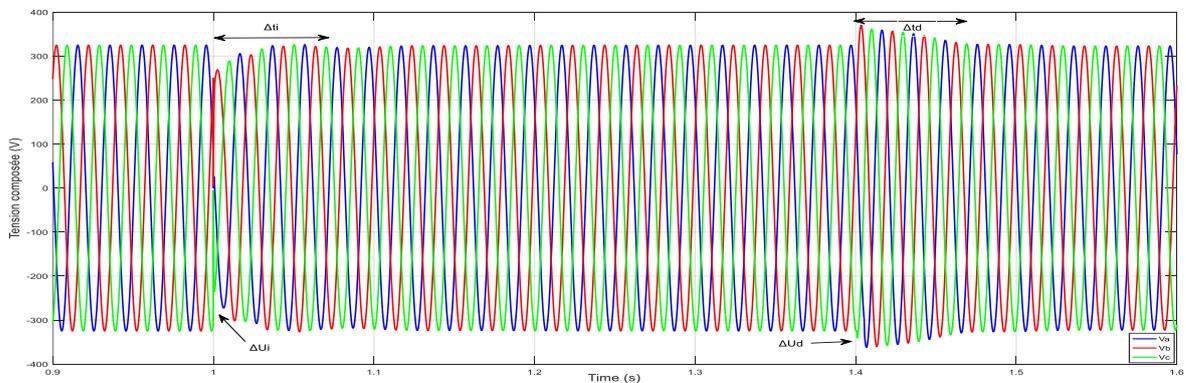
Des efforts considérables ont été consacrés au contrôle des systèmes d'excitation pour améliorer les performances de régulation de la tension en boucle fermée. En 1940, les régulateurs de tension avaient une faible dynamique et étaient principalement à base de composants électromécaniques. Ensuite remplacé par un régulateur PID analogique, puis par un PID numérique avec paramètres fixes et variables en fonction des conditions de fonctionnement [4] et [5]. Récemment, des lois de commandes intelligentes et avancées ont été utilisées dans la conception de régulateurs de tension et de stabilisateurs de réseau électrique pour les SG connectés au réseau tel que la logique floue, réseaux de neurones,  $H_\infty$ , la commande prédictive [2], [6] et [7].

## 3 Problématique de notre travail de recherche

Dans cette étude, nous nous intéressons à la structure d'excitation (brushless excitation) avec une machine AC et un redresseur tournant PD3. Cette structure est utilisée à cause de sa robustesse et de sa fiabilité (voir tableau 3). La variation de la charge connectée à un alternateur a une influence directe sur la tension générée, figure 7 montre la tension composée aux bornes d'un alternateur

durant l'application et le délestage d'une charge linéaire. Avant l'application de la charge, la tension composée est réglée à 320V. Durant l'impact, on assiste à une chute de tension. Lors du délestage, le pont de diodes ne permet pas d'obtenir une tension négative aux bornes de la roue polaire pour accélérer la réduction de son courant lors du délestage de la charge et provoque par conséquent une surtension en sortie de la GP. Cette structure indirecte limite grandement la dynamique du système par rapport à une structure d'excitation qui contrôlerait directement l'inducteur de la GP ; Plusieurs facteurs peuvent limiter la performance de ce système d'excitation (brushless) :

- Le temps de réponse de la machine excitatrice ;
- L'impossibilité d'alimenter la roue polaire par une tension négative ;
- La limitation des performances du régulateur utilisé car il ne prend en compte ni les paramètres de la machine excitatrice ni ceux de la machine principale.



*Figure 7: Influence de la variation de charge sur la tension composée générée aux bornes de l'alternateur.*

Dans le but d'améliorer encore plus les performances de la génératrice synchrone, d'autres structures d'excitation brushless avancées sont proposées récemment, à titre d'exemple la nouvelle structure avancée proposée par [8], [9] qui permet de commander directement l'inducteur de la GP avec des tensions positives et négatives. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de master, dans un premier temps, est de valider la nouvelle structure d'excitation/déexcitation proposée par [8] et dans un deuxième temps, d'intégrer une nouvelle stratégie de contrôle avancée (floue) pour le système de déexcitation pour l'amélioration de la régulation de tension lors du délestage de la charge.

## **4 Conclusion**

Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur la génératrice synchrone. Après un bref aperçu sur l'histoire des machines électriques, nous nous sommes intéressés à quelques applications des alternateurs à charge séparée. Par la suite, les structures d'excitation de machines synchrones les plus largement utilisées dans l'industrie, ont été exposées. Nous avons aussi présenté brièvement les différentes techniques de la régulation de tension des générateurs synchrones.

Dans le chapitre qui suit, une nouvelle structure d'excitation/déexcitation et le développement de la régulation de tension négative pendant le délestage de la charge par une loi de commande floue seront présentées et détaillées.

*Chapitre II*  
*Commande floue pour*  
*la structure de*  
*désexcitation*

---

## *Chapitre II*

# *Commande floue pour la structure de désexcitation*

---

**L**'objectif de chapitre est de développer une nouvelle loi de commande capable de contrôler l'enroulement principal de champ du générateur synchrone avec des tensions négatives. Motivés par la capacité des systèmes flous pour la commande des systèmes très complexes à analyser et commander par les techniques conventionnelles, un contrôle dynamique de la structure de désexcitation pour les machines synchrones sans balais est appliqué avec un contrôleur flou. Avant de nous intéresser à cette loi de commande floue, nous reviendrons sur la nouvelle structure d'alimentation de l'inducteur des machines synchrones déjà introduite dans le [8]. La validation de cette structure d'alimentation pour l'excitation positive se fera dans ce travail en utilisant une loi de commande efficace et robuste : la commande  $H_\infty$ .

## 1 Rappel sur la structure d'excitation classique (Conventional Brushless Excitation (CBE))

Dans cette approche, l'alternateur est équipé d'une excitatrice (machine inversée) montée sur le même arbre de rotation. Elle est connue sous le nom brushless excitation. Le schéma de principe peut être résumé par la figure 8.

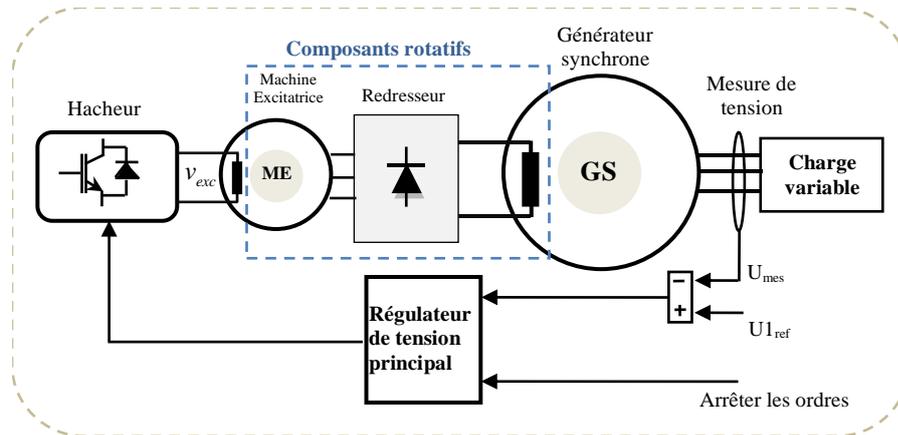


Figure 8: Excitation conventionnelle d'une génératrice synchrone (CBE).

Le rotor bobiné de la génératrice principale est alimenté via un pont redresseur triphasé tournant. Ce dernier est constitué de diodes de puissance, spécialement étudiées pour pouvoir résister à la force centrifuge. Il permet de convertir la tension triphasée de l'alternateur excitateur en une tension continue. L'amplitude de cette tension est réglée grâce au courant d'excitation. Afin d'éviter d'utiliser des bagues et balais pour le transfert d'énergie à l'inducteur de machine principale, l'ensemble rotor d'excitatrice et pont à diodes est monté sur l'axe de rotation. Cette stratégie permet de réduire les coûts de maintenance. Ainsi la partie excitation de l'excitatrice est située sur le stator de la machine et l'on parle de machine inversée car l'induit est au rotor et l'inducteur au stator. Le contrôle de la tension de la GP principale est donc assuré par le courant d'excitation et faite grâce à un régulateur analogique ou numérique. Notons par ailleurs qu'avec ce type de structure, il existe des configurations dans lesquelles des bagues et balais sont utilisés.

Ce système d'excitation industriel possède plusieurs inconvénients qui limitent sa dynamique et ses performances :

- Le contrôle de l'inducteur de la GP se fait de façon indirecte à travers la commande de la machine excitatrice qui possède une dynamique réduite et à travers un pont de diodes qui ne permet pas d'obtenir une tension négative aux bornes de la roue polaire pour accélérer la réduction de son courant lors du délestage de la charge et provoque par conséquent une surtension en sortie de la GP. Cette structure indirecte limite grandement la dynamique du

système par rapport à une structure d'excitation qui contrôlerait directement l'inducteur de la GP ;

Afin de remédier et diminuer le problème de surtension, la structure d'excitation utilisée par la suite est une structure avancée avec un système de désexcitation qui alimente la roue polaire par une tension négative. Ce travail de master tente de proposer une solution en termes d'une nouvelle structure combinée à une méthode de commande floue qui permet de garantir la stabilité et les performances de la régulation de la tension de la GP.

## 2 Système d'excitation avancé (Fuzzy Advanced Brushless Excitation (FABE))

La figure 9 montre la structure d'excitation avancée floue. En utilisant cette structure, il est possible d'alimenter directement la roue polaire par des tensions positives et négatives. L'alimentation de l'excitatrice par une tension négative permet d'améliorer la performance du système durant le délestage.

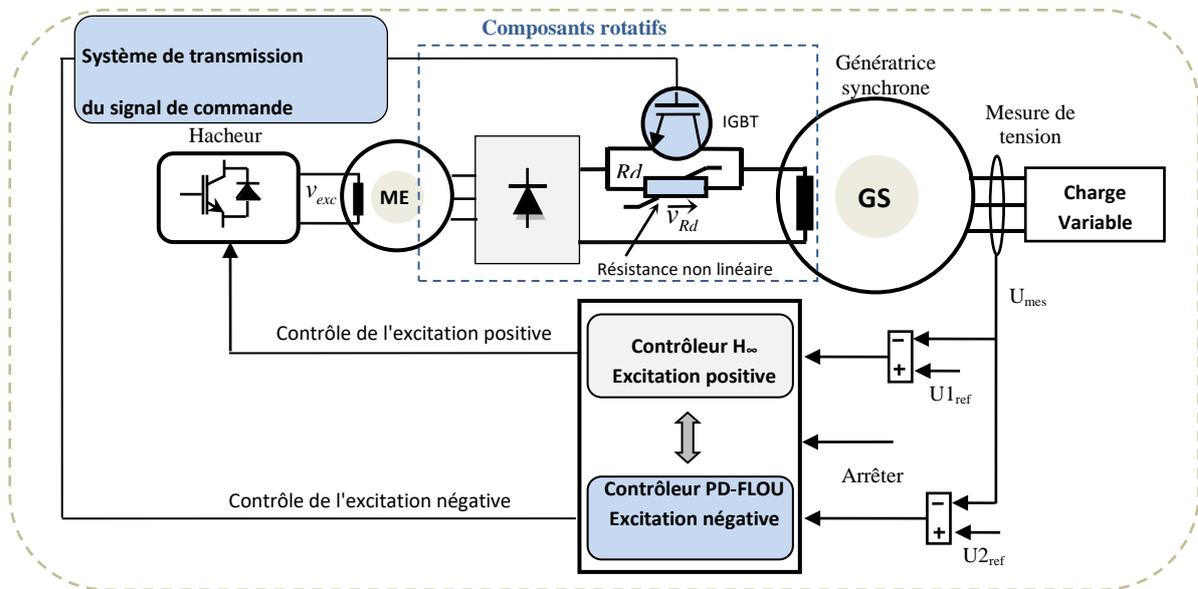


Figure 9: Excitation avancée d'une génératrice synchrone (FABE).

Cette structure comprend deux parties principales :

### 2.1 Système d'excitation positive

Comme présenté sur la figure, cette partie du système d'excitation comprend un régulateur de tension positive conçu en utilisant une loi de commande  $H_{\infty}$ , un hacheur, une machine excitatrice ME et un pont de diodes rotatif. La stratégie de control d'excitation positive est la boucle de commande principale de la régulation de tension, elle fonctionne pendant les états stables et transitoires, La stabilité complète du système, en présence des deux contrôleurs, est assurée par le régulateur  $H_{\infty}$  positif qui considère le fonctionnement dynamique de la structure de désexcitation

comme une perturbation à rejeter. Ainsi, le régulateur d'excitation positive  $H_\infty$  contrôle la tension d'excitation de la ME pour maintenir une tension de référence ( $U_{1ref}$ ) constante du générateur indépendamment de la charge du générateur. Par conséquent, la tension de référence ( $U_{1ref}$ ) du contrôleur est généralement établie égale à la tension nominale du générateur. La loi de commande  $H_\infty$  utilisée pour concevoir le régulateur de tension positive pour la structure CBE et aussi utilisée pour le régulateur positif pour la structure FAGE, car  $H_\infty$  est connu pour sa robustesse aux perturbations externes qui peuvent être définies comme des entrées exogènes

**2.1.1 Conception du contrôleur  $H_\infty$  :**

L'ouverture et la fermeture de l'IGBT doivent être prises en compte dans l'étude de stabilité du système complet. Le régulateur de tension positive synthétisé avec la loi de commande  $H_\infty$  qui effectuant l'excitation positive, est conçu pour prendre en considération le statut de l'IGBT en tant que perturbation à rejeter de cette manière, la stabilité du système est assurée en boucle fermée [8]. La conception du contrôleur, nécessite le modèle d'un générateur synchrone à structure brushless conventionnelle est donné par les équations suivantes :

$$V_{exc} = R_e i_{exc} + L_e \frac{di_{exc}}{dt} - (k_2 k_3) M_{se} \frac{di_f}{dt} \tag{1.1}$$

$$i_{d1} = i_{dq} - C_1 \omega_{ep} v_{qp} - C_1 \frac{dv_{dp}}{dt} \tag{1.2}$$

$$i_{q1} = i_{qp} - C_1 \omega_{ep} v_{dp} - C_1 \frac{dv_{dp}}{dt} \tag{1.3}$$

$$0 = -v_{dp} - R_s i_{dq} + L_q \omega_{ep} i_{qp} - M_{sQ} \omega_{ep} i_Q - L_d \frac{di_{dp}}{dt} + M_{sf} \frac{di_f}{dt} + M_{sD} \frac{di_D}{dt} \tag{1.4}$$

$$0 = -v_{qp} - R_s i_{qp} - L_d \omega_{ep} i_{dp} + M_{sf} \omega_{ep} i_f + M_{sD} \omega_{ep} i_D - L_q \frac{di_{qp}}{dt} + M_{sQ} \frac{di_Q}{dt} \tag{1.5}$$

$$0 = -k_1 M_{se} \omega_{ee} i_{exc} + a i_f + L_f \frac{di_f}{dt} - M_{sf} \frac{di_{dp}}{dt} + M_{fD} \frac{di_D}{dt} \tag{1.6}$$

$$0 = R_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + M_{fD} \frac{di_f}{dt} - M_{sD} \frac{di_{dp}}{dt} \tag{1.7}$$

$$0 = R_Q i_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} - M_{sQ} \frac{di_{qp}}{dt} \tag{1.8}$$

Avec,  $a = k_4 k_3 L_{de} \omega_{ee} + R_f$ .

$R_e$  et  $L_e$  désignent respectivement la résistance et l'inductance de l'inducteur de la ME;

$R_s$ ,  $L_f$  et  $R_f$  sont respectivement la résistance du stator de la GP, l'inductance et la résistance de l'inducteur de la GP ;

$L_d$  et  $L_q$  sont respectivement l'inductance statorique directe et transversale de la GP.

$R_D$ ,  $R_Q$ ,  $L_D$  et  $L_Q$  sont respectivement les résistances directes et transversales des amortisseurs, et les inductances directes et transversales des amortisseurs de la GP.

$M_{sf}$  et  $M_{fD}$  sont respectivement l'inductance mutuelle entre la roue polaire et l'enroulement statorique de l'axe d (direct), inductance mutuelle entre la roue polaire et l'enroulement amortisseur de l'axe d.

$M_{sD}$  et  $M_{sQ}$  inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et les enroulements d'amortisseur selon les axes d(directe) et q(transversal);

$\omega_{ep}$  et  $\omega_{ee}$  sont respectivement la vitesse angulaire électrique du GP et du ME;

$C_1$  représente un condensateur virtuel triphasé ajouté à la borne du SG pour modéliser le courant de charge comme une perturbation à rejeter par le régulateur de tension.

Où  $k_1$ ,  $k_4$  et  $k_3$  sont des constantes qui dépendent des paramètres de la ME (inductances de fuite, inductance magnétisante de l'axe d, etc.) et du mode de fonctionnement du pont,  $k_2$  est un facteur de correction, comme expliqué dans [2]

$i_{d1}$  et  $i_{q1}$  sont les courants de charge dans le repère  $dq$ .

$v_{exc}$  et  $i_{exc}$  sont respectivement la tension d'excitation et le courant d'excitation de la ME

les variables  $v_{dp}$ ,  $v_{qp}$ ,  $i_{dp}$  et  $i_{qp}$  sont les tensions et courants du générateur dans le repère  $dq$

$i_D$  et  $i_Q$  représentent respectivement les courants directs et transversaux des amortisseurs et  $i_f$  désigne le courant de la roue polaire de la GP

Les équations de (1.1) à (1.8), montrent que la tension du générateur dépend de la tension d'excitation de la machine excitatrice  $v_{exc}$  et du courant de charge du générateur  $i_{d1}$  et  $i_{q1}$ .

Afin d'assurer la stabilité de la régulation de tension lors de l'ouverture et de la fermeture de l'IGBT, nous représentons l'IGBT avec la résistance de décharge par une tension variable  $v_{Rd}$  connectée en série avec l'enroulement de champ de l'inducteur de la GP (figure 9).

Nous pouvons écrire l'équation (1.6) comme suit

$$v_{Rd} = -k_1 M_{se} \omega_{ee} i_{exc} + a i_f + L_f \frac{di_f}{dt} - M_{sf} \frac{di_{dp}}{dt} + M_{fD} \frac{di_D}{dt} \quad (2)$$

Où :

$$v_{Rd} = \begin{cases} 0 & (\text{lorsque l'IGBT est fermée}) \\ -R_d i_f & (\text{lorsque l'IGBT est ouverte}) \end{cases} \quad (3)$$

Par conséquent, le modèle du GS avec l'ABE est alors décrit par les équations. (1,1) à (1,8) combiné avec l'équation (2), et peut être représentée par

$$U = R_c X + M_c \dot{X} \quad (4)$$

$$\text{Où : } U = (v_{exc}, i_{d1}, i_{q1}, 0, 0)^T \quad \& \quad X = (i_{exc}, v_{dq}, v_{qp}, i_{dp}, i_{qp}, i_f, i_D, i_Q)^T$$

L'équation (4) peut être écrit dans la forme de modélisation d'espace d'états comme suit

$$\dot{X} = AX + BU \quad (5)$$

Où :  $A = -M_c^{-1}R_c$  la matrice d'état ;  $B = -M_c^{-1}$  la matrice de contrôle.

Afin de représenter les courants de charge du générateur ( $i_{d1}$ ,  $i_{q1}$ ) et  $v_{Rd}$  en tant qu'entrées exogènes, le modèle de système donné dans l'équation (5) est réécrit comme :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1 W_1 + B_2 U_1 \\ Y = CX \end{cases} \quad (6)$$

Où :

$$W_1 = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ v_{Rd} \end{bmatrix} ; U_1 = v_{exc} ; B_1 = B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} ; B_2 = B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} ; C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$U_1$  est le signal de commande ;  $W_1$  est le vecteur d'entrée exogène et Y est la sortie du modèle de système. La figure 10 représente le système global.

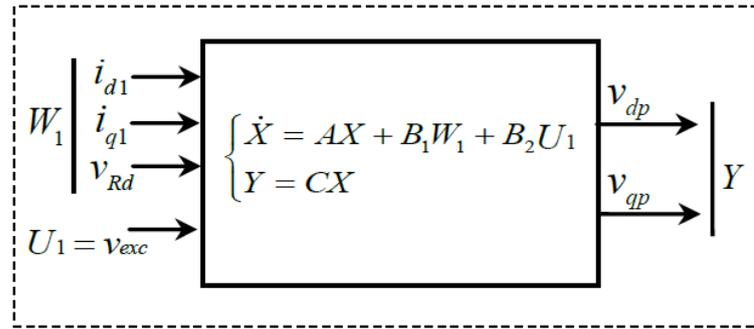


Figure 10: Schéma fonctionnel du système global sous forme d'espace d'états.

La méthode de modélisation proposée présente deux avantages :

Premièrement,  $v_{Rd}$  est exprimé comme une entrée exogène ; ainsi, la stabilité de la régulation de la tension du générateur est assurée pendant le fonctionnement de l'IGBT.

Deuxièmement, le modèle considère le courant de charge du générateur comme une entrée exogène. En conséquence, il est possible de concevoir un régulateur de tension robuste vis-à-vis des variations brusques de la charge du générateur.

D'après le modèle donné dans l'équation (6), un régulateur de tension synthétisé avec la loi de contrôle de rétroaction  $H_\infty$ .

Un régulateur de tension  $H_\infty$  est conçu pour la régulation de la tension du générateur en contrôlant le courant d'excitation de l'ME.

## 2.2 Système de désexcitation

La structure de désexcitation est composée d'un IGBT rotatif connecté en série avec l'enroulement de champ de l'inducteur de la GP et d'une résistance de décharge non linéaire montée en parallèle avec l'IGBT. Dans cette structure, on propose d'utiliser un contrôleur flou, la figure 11 montre le schéma de principe de la commande d'excitation négative avec un régulateur PD-Flou.

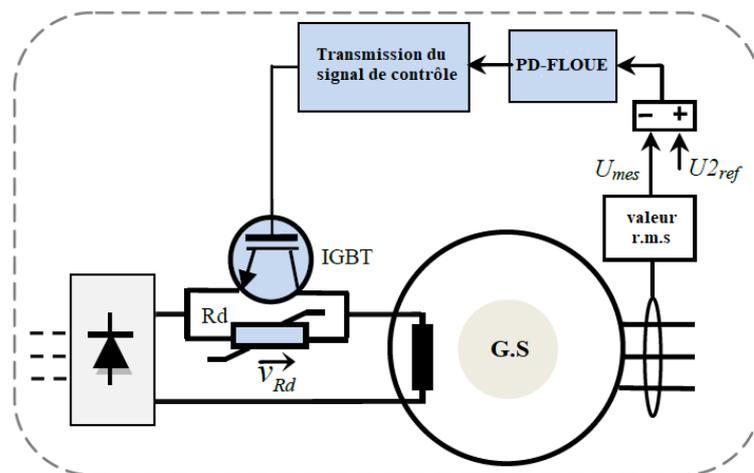


Figure 11: Commande floue du système de désexcitation.

En régime permanent, l'IGBT est contrôlé par un contrôleur d'excitation négative de type PD-Flou basé sur la tension mesurée aux bornes de la GS, pour être en position fermée. Cependant, pendant les états transitoires, Le contrôle dynamique de la structure de désexcitation utilise un système de décharge auto-actionnable par contrôleur négatif de type PD-Flou, basé sur la surveillance en continu du niveau de la tension référence ( $U_{2ref}$ ).

En position ouverte, la résistance de décharge induit une tension d'excitation négative dans l'enroulement de champ de l'inducteur de la GP, et par conséquent, le générateur est rapidement désexcité.

Un dispositif IGBT est sélectionné car il est largement utilisé dans les applications d'alimentation, et nous n'avons besoin que d'une sortie numérique pour contrôler l'ouverture et la fermeture de l'IGBT. Concernant la résistance de décharge, nous avons utilisé une résistance non linéaire car elle est généralement utilisée pour arrêter rapidement l'excitation de la GS.

En s'inspirant de différents schémas de commande des systèmes d'excitation, il est possible d'envoyer les ordres d'ouverture et de fermeture à l'IGBT rotatif via une communication sans fil, un système à bague-balais, les performances de la structure FABA seront évaluées en considérant le système de transmission des ordres d'ouverture et de fermeture à l'IGBT rotatif comme un filtre passe-bas avec constante de temps.

Cependant, avec un contrôleur PD-Flou, nous surveillons la valeur efficace de la tension du générateur et la vitesse de sa variation.

### **2.2.1 Conception du contrôleur d'excitation négative**

La génératrice synchrone est utilisée pour la production d'énergie électrique dans divers domaines tels que l'industrie automobile, les centrales électriques, l'industrie navale, etc. Du fait de son importance, il est primordial de maîtriser son fonctionnement grâce à des lois de commande performantes. Un régulateur PD -Flou est choisi en raison de sa sensibilité et est réglable en fonction de l'application, l'entrée du régulateur est la différence entre la référence de tension valeur ( $U_{2ref}$ ) et la tension d'alternateur mesurée ( $U_{mes}$ ), la référence de tension ( $U_{2ref}$ ) est fixée à 105% de la tension nominale du générateur, en régime permanent, la tension d'alternateur mesurée est régulée par le contrôleur positif à  $U_{1ref}$  qui est généralement fixé à 100%.

Nous allons maintenant illustrer les principes de la conception du contrôleur flou.

Pour synthétiser un contrôleur flou, cinq étapes sont nécessaires [10], que nous allons détailler successivement

1. La première consiste à choisir la structure et le type contrôleur à utiliser.

2. La seconde consiste à choisir les variables linguistiques d'entrée et de sortie, ce choix dépend d'une part du type de la commande que l'on veut réaliser et d'autre part des signaux disponibles.
3. La troisième étape a pour objectif de définir les sous-ensembles flous caractérisant les variables linguistiques, et choisir les fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous, notons que le choix de fonctions d'appartenance est essentiellement basé sur l'intuition et l'expérience de l'opérateur.
4. La quatrième étape définition du comportement du contrôleur flou. Cette dernière est obtenue à partir de l'expérience et des connaissances acquises sur le système à commander.
5. Le choix de la méthode de défuzzification fait l'objet de la dernière étape.

### 2.2.1.1 La 1ère étape

La structure utiliser pour commander l'IGBT et un régulateur PD-Flou de type MAMDANI. Le principe du régulateur PD-Flou est de remplacer par la valeur défuzzification de la commande, la commande calculée grâce à un PD classique, où  $K_p$  et  $K_d$  sont les gains (coefficients) de Proportionnalité et de Dérivation, respectivement, ceci rend le SIF équivalent à un PD avec des gains  $K_p$  et  $K_d$  variables et non linéaires, puisque la sortie d'une SIF est généralement non linéaire par rapport à ces entrées. [10],[11].

L'algorithme de base d'un contrôleur PD classique est exprimé par :

$$U_{pd} = K_p * e + K_d * \dot{e} = K_p * \{e + T_d * \dot{e}\} \quad (7),$$

Avec  $T_d = K_d/K_p$  la constante de temps dérivée. Si  $e$  et  $\dot{e}$  sont des variables floues alors  $U_{PD}$  de l'équation précédente Représentera la commande PD-Floue,  $K_p$  et  $K_d$  représentent les facteurs d'échelle où les gains d'entrée de l'erreur et de son dérivé, on fait varier ces facteurs jusqu'à ce qu'on trouve un phénomène de réglage convenable, Ils permettent aussi de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer sa structure, L'évaluation des gains provient de l'expérience, ces valeurs font partie de la procédure d'évaluation par simulation, en effet ces derniers ont un grand effet sur les performances statique et dynamique de la commande.

On a choisi la structure PD-Floue à cause de ces bonnes performances pendant le fonctionnement dynamique contrairement à la structure PI-Floue qui donne une mauvaise performance pendant l'état transitoire traduite par un temps de montée grand et un handicap pour la compensation rapide des perturbations, malgré que cette dernière structure est connue pour être très pratique à l'élimination de l'erreur en régime statique[11], mais pour notre cas, en régime permanent la tension d'alternateur mesurée est régulée par le contrôleur positif  $H_\infty$  à  $U1_{ref}$

Le schéma bloc de commande durant le test du délestage de la charge de la GP par un régulateurs PD-Flou est illustré par la figure (figure 12) ci-dessous

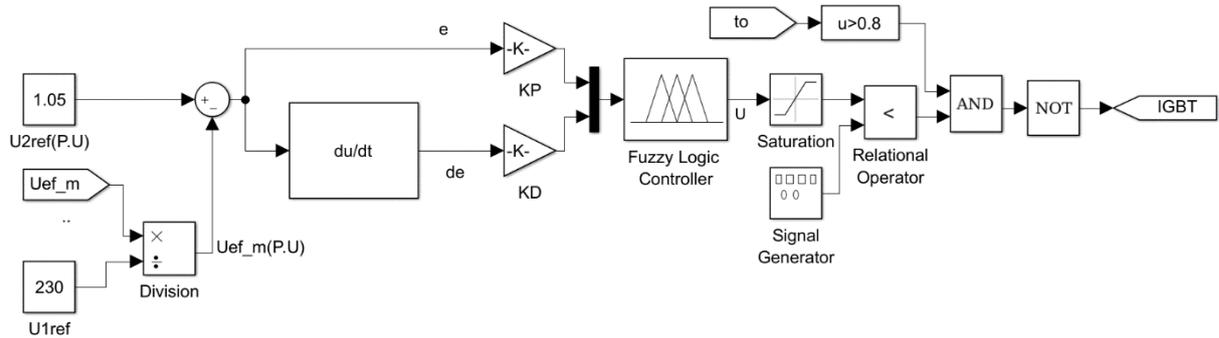


Figure 12 : Structure de réglage par un contrôleur PD-Flou de la tension de dépassement d'un GS.

D'après ce schéma, le système est composé :

- \* d'un contrôleur flou composé :
  - d'un bloc de calcul de variation de l'erreur au cours du temps ( $de/dt$ ) ;
  - des facteurs d'échelles associés à l'erreur, et sa dérivée ;
  - d'un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation ;
  - des règles de contrôle flou et d'un moteur d'inférence ;
  - d'un bloc de défuzzification utilisé pour la variation de la commande floue en valeur numérique ;
- \* du processus à contrôler

**2.2.1.2 La 2ème étape : Choix des entrées et sorties**

Il s'agit de déterminer les caractéristiques fonctionnelles (1) et opérationnelles (2) du contrôleur.

(1) - Il faut d'abord choisir les variables d'entrée et de sortie.

Leur choix dépend du contrôle que l'on veut réaliser. Que souhaite-t-on au juste commander ?

À l'aide de quels paramètres va-t-on obtenir la commande ?

(2) -Il faudra ensuite se pencher sur le domaine des valeurs que pourront prendre ces (variables linguistique).

On partitionnera alors ces domaines en intervalles, auxquels on associera un label descriptif.

Dans notre cas de la régulation de la tension de sortie du GS, on a besoin de trois variables linguistiques, deux pour l'entrée : l'erreur (e), la dérivée de l'erreur ( $de/dt$ ), et une pour la sortie qui sera la commande appliquée au processus (commande de l'IGBT).

**2.2.1.3 La 3ème étape**

Cette étape revient à définir les univers des discours des variables d'entrée et de sortie et les diviser en sous-ensembles flous, cette répartition est intuitive et basée sur l'expérience, on est d'ailleurs généralement amené à l'affiner en cours de conception.

Une règle de bonne pratique est de fixer 5 à 9 intervalles par univers de discours.

Il faut également prévoir un plus grand nombre de zones à proximité du point de fonctionnement optimal pour en faciliter l'approche régulière.

Pour chaque variable linguistique, nous avons choisi sept (7) valeurs linguistiques sont nommées : NG (négatif grand), NM (négatif moyen), NP (négatif petit), EZ (égal zéro), PP (positif petit), PM (positif moyen) et PG (positif grand).

L'univers du discours est réparti donc en sept pour les variables d'entrées et de sortie ; c'est-à-dire sept ensembles flous pour chaque entrée et sortie, l'intervalle de l'univers de discours des variables linguistiques et sélectionné par les valeurs maximales de la plage de variation réel de chaque grandeur, ces intervalles sont centrés sur zéro.

On a choisi la forme des fonctions d'appartenances triangulaire à cause de leur simplicité de mise en œuvre

#### **2.2.1.4 La 4<sup>ème</sup> étape Définition du comportement du contrôleur flou**

Cette étape concerne l'élaboration de la base de règle (réglé d'inférence) du contrôleur par l'analyse du comportement dynamique du système pour détermination du jeu de règles du contrôleur flou et choisir l'engin d'inférence (agrégation des règles) qui permet de définir la stratégie de contrôle en utilisant les implications floues qui lient les différentes variables de chaque règle.

Le nombre des ensembles flous pour chaque variable linguistique (l'erreur ( $e$ ), le dérivé d'erreur ( $de$ ) et la sortie ( $u$ )) de notre régulateur floue est sept donc il faut  $7 \times 7 = 49$  règles d'inférence.

Sachant qu'il n'existe pas une loi bien définie pour la détermination de la décision de chaque règle. L'expérience humaine, dans ce cas joue un rôle très important. Les règles d'inférence pour notre système sont représentées par une matrice d'inférence selon le tableau 7

Parmi le mécanisme d'inférence les plus utilisés : MAX-MIN, MAX-PROD et SOM-PROD.

Le raisonnement utilisé pour le mécanisme d'inférence floue est celui de SOM-PROD

Les règles d'inférence utilisées sont de type :

Si ( $e$ ) est ( $x_1$ ) Et ( $de$ ) est ( $x_2$ ) ALORS ( $U$ ) est ( $x_3$ ) (implication de MAMDANI) ou  $x_1, x_2, x_3$  sont des valeurs linguistiques des variable linguistique  $e, de/dt$  et  $U$  respectivement.

En décrivant point par point le comportement du processus et l'action de variation de commande à appliquer, on en déduit la table suivante (tableau 6) (table du contrôleur flou de base) qui correspond en fait à une table des règles

*Tableau 6: Description du comportement et ajustement du processus.*

$e$	$de/dt$	Action	U
+	+	L'erreur est positive (pas de dépassement de tension à la sortie du GS) et tend à devenir encore plus positive, il faut assez augmenter le signal de commande pour IGBT reste fermé.	+
+	0	L'erreur est positive (pas de dépassement de tension) et ne change pas, il faut augmenter le signal de commande pour IGBT reste fermé	+
+	-	L'erreur est positive (pas de dépassement de tension) et son changement est négatif, il se rapproche du zéro, la correction doit être faible positive	+
0	+	L'erreur est nulle, mais tend à s'éloigner du zéro vers l'augmentation au valeurs positives (pas de dépassement de tension), il faut augmenter un peu le signal de commande pour fermer l'IGBT.	+
0	0	L'erreur est nulle et ne change plus (régime permanent), le signal de commande doit être maintenu à sa valeur actuelle	0
0	-	L'erreur est nulle mais tend à s'éloigner du zéro vers les valeurs négatives (dépassement de tension), il faut diminuer le signal de commande pour ouvrir l'IGBT.	-
-	+	L'erreur est négative (dépassement de tension) et son changement est positif, comme il se rapproche de la consigne, la correction doit être faible négative pour ouvrir l'IGBT.	-
-	0	L'erreur est négative (dépassement de tension) et ne change pas, il faut apporter une correction moyenne négative pour ouvrir l'IGBT	-
-	-	L'erreur est négative (dépassement de tension) et tend à devenir encore plus négative, il faut beaucoup diminuer la commande pour ouvrir l'IGBT.	-

Cet ensemble de règles regroupe toutes les situations possibles du système évaluées par les différentes valeurs attribuées à  $e$  et à sa variation  $de/dt$  et toutes les valeurs correspondantes de la commande  $u$ .

*Tableau 7: Matrice d'inférence pour la variation de la commande en fonction de ( $e$ ) et ( $de$ ).*

$e \backslash de/dt$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NM	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NP	NG	NG	NM	NP	PP	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PM	NS	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PG	NS	NP	NP	PP	PG	PG	PG

**2.2.1.5 La 5<sup>ème</sup> étape Défuzzification :**

Comme on l'a vu à la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent une fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie, il s'agit donc d'une information floue, l'IGBT utilisé dans la boucle de commande ne s'accompagne pas à ce genre de décision, or la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue prenant sa valeur dans un intervalle, il convient de la transformer la fonction d'appartenance en une grandeur de commande précise : c'est le but de l'étape de la défuzzification.

Donc la défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou (fonction d'appartenance) résultant de l'agrégation des règles d'inférence en une grandeur de commande précise, elle jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire pour un tel état du processus.

La méthode utilisée pour la défuzzification est celle du centre de gravité.

**2.2.2 Réglage**

Un contrôleur flou possède de nombreux paramètres de réglage, ce qui peut, à priori, effrayer ses utilisateurs potentiels. En effet, contrairement aux contrôleurs classiques, le contrôleur flou possède un nombre plus conséquent de paramètres, et offre, un nombre de degrés de liberté plus élevé.

On peut distinguer parmi les choix et les réglages à faire :

- L'expression des règles,
- La définition des variables et des valeurs linguistiques, avec leurs fonctions d'appartenance associées,
- La méthode d'implication,
- La méthode d'inférence (agrégation),
- La méthode de défuzzification,
- Les facteurs d'échelle sur les entrées et les sorties du contrôleur.

Cependant, on constate une certaine insensibilité du résultat au choix des méthodes d'implication, d'inférence et de défuzzification, pour les autres paramètres, un réglage séquentiel est possible :

- Fonctions d'appartenance,
- Règles.

Le réglage par essais successifs de ces nombreux paramètres étant assez long et fastidieux, diverses techniques d'autoréglage, d'optimisation et d'apprentissage ont été développées, on peut citer, à titre d'exemple, les techniques de la programmation mathématique, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

**2.2.3 Résistance non linéaire**

Les résistances non linéaire sont appelé des varistances à oxyde métallique (MOV), aussi appelé parafoudre il sont composées d'oxydes métalliques (oxydes de zinc ZnO pour les dernières générations, le carbure de silicium (SiC) ayant été utilisé antérieurement). Les poudres d'oxyde métallique sont assemblées par frittage sous la forme de bloc de céramique, le plus souvent sous forme de cylindre ou de disque, on assemble ces blocs dans une enveloppe isolante (céramique ou polymère) pour former un parafoudre. Ces blocs de varistance ont une caractéristique tension/courant extrêmement non linéaire. Au-delà d'un certain seuil de tension, l'impédance de la varistance chute pour permettre l'évacuation du courant créant la surtension ; quand la tension revient à son niveau normal, l'impédance de la varistance reprend sa valeur à l'état de veille (donc pas de courant). Pour les fortes amplitudes de courant dévié, la tension aux bornes de la varistance augmente. Ce type de composant est utilisé pour protéger le réseau de distribution et également les équipements terminaux sous forme d'appareillage électrique.

**3 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté un nouveau système de désexcitation utilisant une loi de commande floue pour améliorer la régulation de la tension de la GS lors des tests de délestage de la charge. Le système global est basé sur la structure d'excitation brushless associée avec une loi de commande  $H_\infty$ . Le chapitre suivant va présenter les réponses et les performances du système d'excitation avancé en utilisant des essais de simulations basés sur des impacts, des délestages de différentes charges.

*Chapitre III*  
*Analyse & Validation*  
*des résultats*

## *Chapitre III*

### *Analyse & Validation des résultats*

---

**D**ans les deux chapitres précédents, une étude des structures d'excitation de génératrice synchrone a été faite et une nouvelle loi de commande pour la structure d'excitation négative (désexcitation) basée sur l'utilisation d'une loi de commande floue a été proposée.

Dans ce dernier chapitre, une étude comparative entre deux structures d'excitation (classique et avancée) sera faite, l'objectif d'une telle démarche étant de vérifier les avantages apportés par la structure d'excitation avancée d'une part et de montrer que l'association de cette structure avec une loi de commande floue permet d'obtenir de meilleures performances. Une étude qualitative sur le comportement des deux structures lors des essais d'impact/délestage de charge sera fournie à la fin du chapitre.

**1 Mesure des performances des systèmes d'excitation**

Afin de mesurer les performances de chaque système d'excitation dans la régulation de la tension de la GP, des tests d'impact et de délestage des différentes charges sont réalisés. Durant l'impact, on mesure la chute de tension ( $\Delta U_i$ ) et le temps de réponse ( $\Delta t_i$ ). Durant le délestage, on mesure le dépassement de tension ( $\Delta U_d$ ) et le temps de réponse ( $\Delta t_d$ ). La tension efficace est calculée en utilisant les tensions statoriques simples ( $v_a, v_b$ , et  $v_c$ )

$$U_{eff} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \tag{8}$$

**2 Charges utilisées et paramètres du GS et de la ME**

Dans ce chapitre, on va comparer les différents résultats en utilisant les deux structures. Des tests d'impact/délestage sont réalisés. Le tableau 8 montre les charges (R, L) utilisées durant l'impact.

*Tableau 8. Les charges utilisées lors de l'impact et délestage.*

Test	P(KW)	S(KVA)	Q(KVA)	PF
<b>100<sub>0.8</sub></b>	8.96	11.2	6.72	0.8
<b>100<sub>0.6</sub></b>	6.72	11.2	8.96	0.6
<b>100<sub>0.3</sub></b>	3.36	11.2	10.6	0.3
<b>150<sub>0.8</sub></b>	13.4	16.8	10	0.8

**P** est la puissance active ; **Q** est la puissance réactive ; **S** est la puissance apparente ; **FP** est le facteur de puissance.

Les paramètres de la GP et de la machine excitatrice sont donnés dans le tableau suivant :

*Tableau 9: Paramètre du GS et de la ME (résistances en  $\Omega$ , inductances en mH )*

<b>SG (rated apparent power: 11.2 kVA)</b>						
Pôles	$R_s$	$R_f$	$L_f$	$L_d$	$M_{sf}$	$L_q$
4	0.71	2.06	695	63.6	200.5	38.6
$L_D$	$L_Q$	$M_{fD}$	$M_{sD}$	$M_{sQ}$	$R_D$	$R_Q$
0.0685	0.0236	6.7	2	0.9	8.6e-4	9.9e-4
<b>EM</b>						
Pôles	$R_{se}$	$R_e$	$L_e$	$L_{de}$	$M_{se}$	$L_{qe}$
8	0.26	24.5	1750	5.8	89	3.1

### 3 Modèle de simulation et commande floue

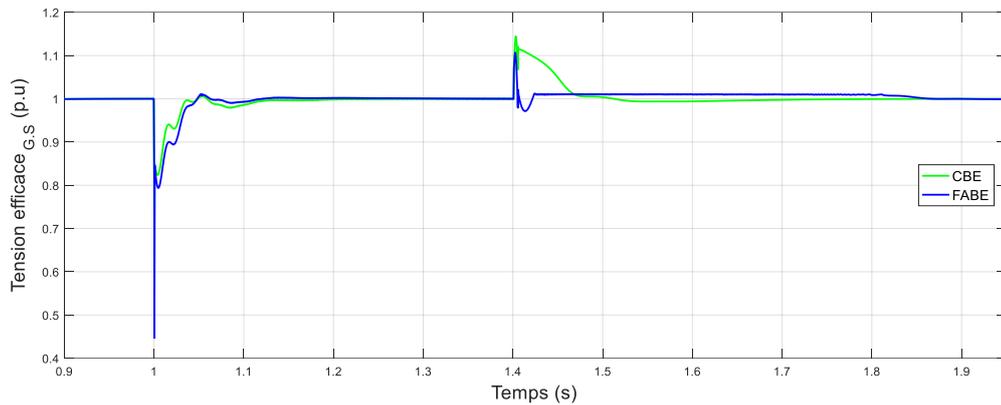
La modélisation d'un alternateur est la conception d'un modèle qui permet de décrire son fonctionnement statique et dynamique. Parmi les objectifs de la modélisation, on peut citer la compréhension, l'identification, la simulation, le diagnostic, la commande et la conception d'un prototype. L'objectif choisi et les hypothèses simplificatrices prises en compte ont une influence directe sur le choix de méthode de modélisation, la complexité et la précision du modèle. Dans ce travail, les tests présentés ci-dessus sont effectués en utilisant un modèle de simulation validé expérimentalement, d'une machine industrielle munie de son système de régulation de tension  $H^\infty$ . Ces simulations ont été réalisées avec Matlab Simulink. Le modèle du générateur synchrone brushless comprend la génératrice principale, l'excitatrice, les diodes tournantes (PD3), l'IGBT (l'interrupteur statique) et la résistance de décharge. La loi de commande basée sur la méthode  $H^\infty$  prend en considération les paramètres et le modèle de la structure d'excitation combinée avec la GP, et assure la stabilité du système avec une bonne poursuite et un bon rejet des perturbations liées aux variations de charge et durant l'ouverture/fermeture de l'interrupteur statique (l'IGBT). Malgré l'amélioration des performances avec ce régulateur dans le cas d'une structure classique, cette structure d'excitation possède plusieurs inconvénients qui limitent la dynamique du système [8]. Par exemple, le pont de diodes ne permet pas d'alimenter l'inducteur de la GP par une tension négative, la commande de la roue polaire se fait à travers la commande de la ME donc pendant le délestage, le régulateur  $H^\infty$  à une faible influence sur le dépassement de tension. Pour cela, nous avons utilisé la nouvelle structure excitation/désexcitation (voir figure 9) et intégré une nouvelle stratégie de contrôle avancée floue pour le système de désexcitation afin d'améliorer la régulation de tension lors du délestage de la charge. La nouvelle structure d'excitation avancée (FABE) est donc composée de la structure d'excitation sans balais conventionnelle (CBE) contrôlée par un régulateur de tension positive en utilisant la loi de commande  $H^\infty$ , et d'une partie de désexcitation rapide capable de fournir pendant les états transitoires, des tensions d'excitation négatives à l'enroulement de champ de l'inducteur de la GS, associée à un contrôleur négatif de type PD-Floue (qui représente notre contribution dans ce travail pour l'amélioration des performances des générateurs synchrones lors de la désexcitation).

### 4 Impact et délestage des différentes charges

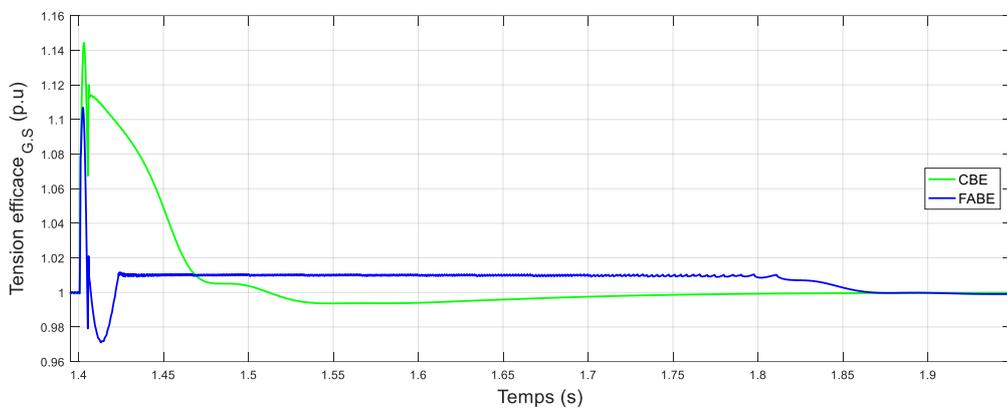
Dans ce chapitre, on va comparer les différents résultats en utilisant les deux structures (CBE & FABE). Des tests d'impact/délestage sont réalisés, le tableau 8 montre les charges (R, L) utilisées durant l'impact. Avant l'application de la charge, le GS est déchargé, après l'impact de la charge, lorsque le système atteint à nouveau son état stationnaire, un test de délestage est effectué pour

ramener le générateur à son état initial (c'est-à-dire déchargé). Les figures :13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 et 20 montrent les réponses des deux systèmes (CBE, FABE) lors des tests d'impact et délestage. Les courbes vertes se réfèrent à la réponse du système utilisant le système d'excitation sans balais classique (CBE) ; les courbes bleues se réfèrent au système FABE avec une stratégie de contrôle de rétroaction PD-Floue pour la désexcitation lors de délestage de charge.

**4.1 Charge nominale  $100_{0.8}$**



*Figure 13: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8.*



*Figure 14: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8.*

4.2 Charge 100<sub>0.3</sub>

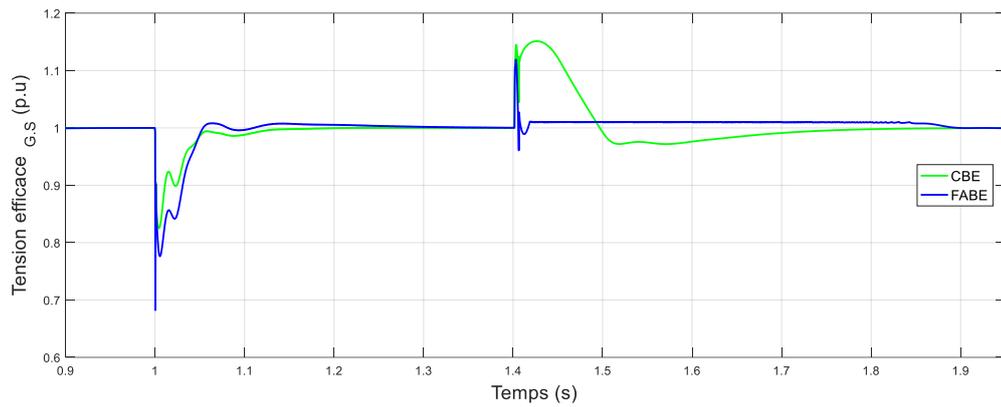


Figure 15: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.3.

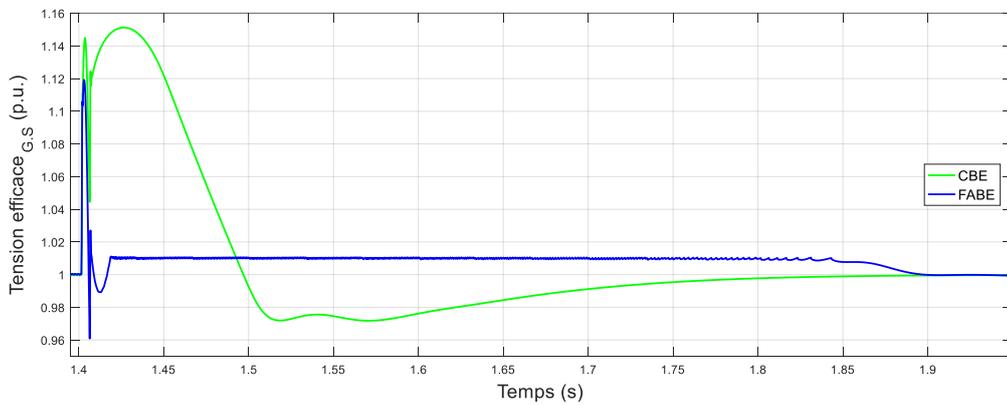


Figure 16: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.3.

4.3 Charge 100<sub>0.6</sub>

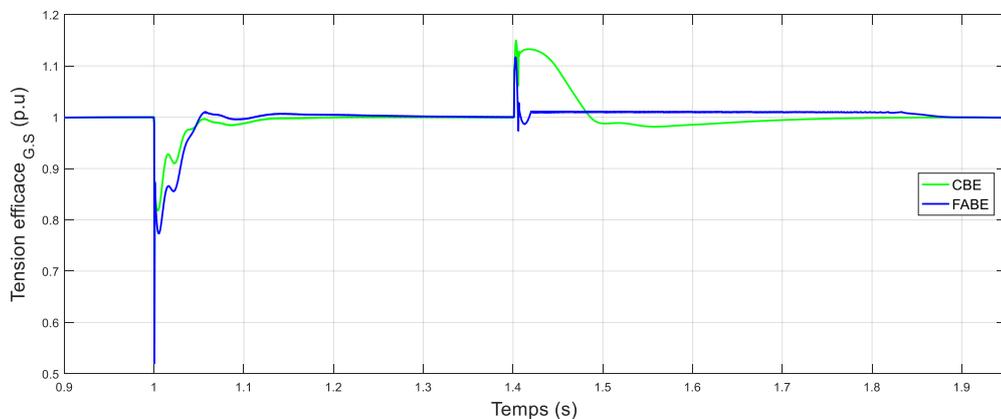


Figure 17: Tension efficace du générateur lors de l'impact d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.6.

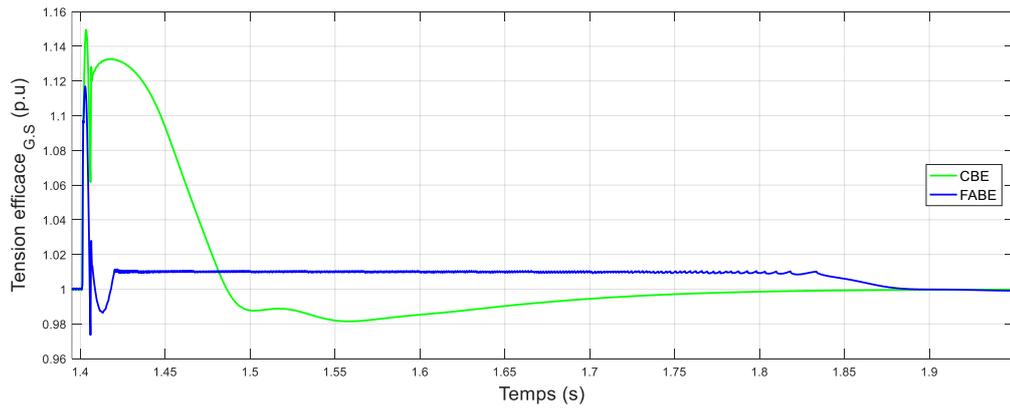


Figure 18: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 100% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.6.

#### 4.4 Charge 150<sub>0.8</sub>

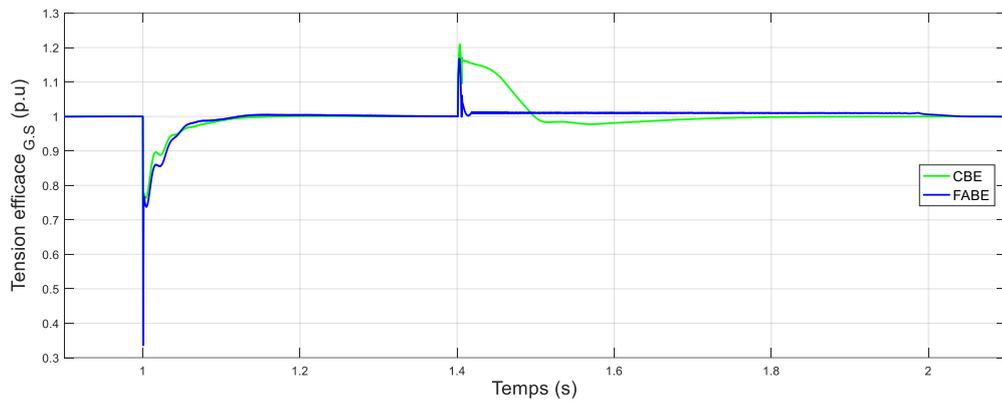


Figure 19: Tension efficace du générateur lors de l'impact et délestage d'une charge qui consomme 150% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8.

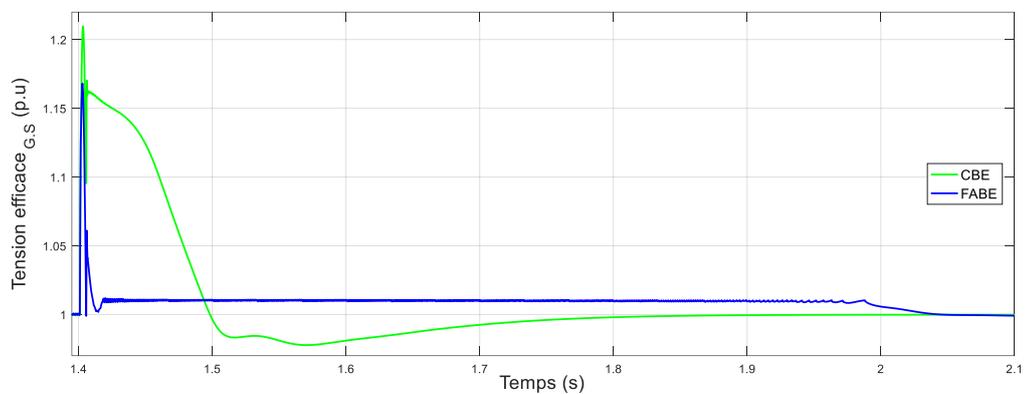


Figure 20: Zoom lors de délestage d'une charge qui consomme 150% de la puissance apparente du GS avec un facteur de puissance de 0.8.

Lors d'un impact de charge, les différentes figures montrent une chute de tension du générateur due à la réaction d'induit. Le régulateur de tension positive  $H^\infty$ , pour les deux structures CBE et FABE, contrôle le courant d'excitation de l'ME pour réguler la tension à sa valeur nominale ( $1p.u$ ). Nous pouvons voir sur les figures que les systèmes CBE et FABE donnent approximativement les mêmes résultats en termes de stabilité, de chute de tension et de temps de réponse. Ceci est attendu car le contrôleur d'excitation négative du système (FABE) ordonne la fermeture de l'IGBT.

Lors des tests de délestage avec différentes charges, lorsque la tension du générateur augmente, l'IGBT du système FABE s'ouvre et introduit la résistance de décharge pour désexciter rapidement le générateur. Cependant, le système CBE ne peut pas effectuer cette désexcitation rapide car le pont tournant n'est pas capable de fournir des tensions négatives. De plus, nous devons considérer le temps de réponse de la machine excitatrice qui réduit la dynamique du système CBE. Pour cela, le dépassement de tension du générateur et le temps de réponse obtenus avec le système CBE sont supérieurs à ceux obtenus avec les systèmes FABE.

L'amélioration est principalement liée à la capacité de la structure FABE à alimenter le bobinage de l'inducteur de la GP par des tensions d'excitation négatives qui désexcitent rapidement le générateur. En outre, la stabilité du système est également maintenue, grâce à la conception  $H^\infty$  qui prend en compte le fonctionnement IGBT comme une perturbation à rejeter.

Les résultats obtenus montrent également que le contrôleur d'excitation négative PD-Flou donne une réponse stable et rapide lors des tests de délestage, par rapport au système CBE.

## **5 Effet du temps de réponse du système de transmission du signal de commande**

Les résultats précédents sont obtenus en négligeant le temps de la réponse du système de transmission de signal de la commande utilisé pour commander l'IGBT tournant. Dans cette section, le système de transmission est modélisé par un filtre passe-bas. Deux constantes de temps du filtre passe-bas ( $\tau_{2.5} = 2.5 \text{ ms}$  et  $\tau_5 = 5 \text{ ms}$ ) sont considérées. Le comportement des systèmes est présenté lors de délestage des charges indiquées dans le tableau 8. Les figures : 21, 22, 23 et 24 montrent les résultats obtenus avec le CBE et le FABE qui a donné les meilleurs résultats dans la sous-section précédente. La courbe rouge fait référence à la réponse FABE en présence du filtre passe-bas avec une constante de temps égale à 2.5 ms ( $\tau_{2.5} = 2.5 \text{ ms}$ ). La courbe en pointillé noire correspond à la réponse de l'FABE en présence d'un filtre de 5 ms ( $\tau_5 = 5 \text{ ms}$ ), de plus, les figures montrent la courbe bleue qui représente la réponse FABE obtenue en négligeant le système de transmission du signal de commande ( $\text{FABE}_{\tau_0}$ ). Enfin, la courbe verte représente la réponse du CBE.

5.1 Charge nominale  $100_{0,8}$

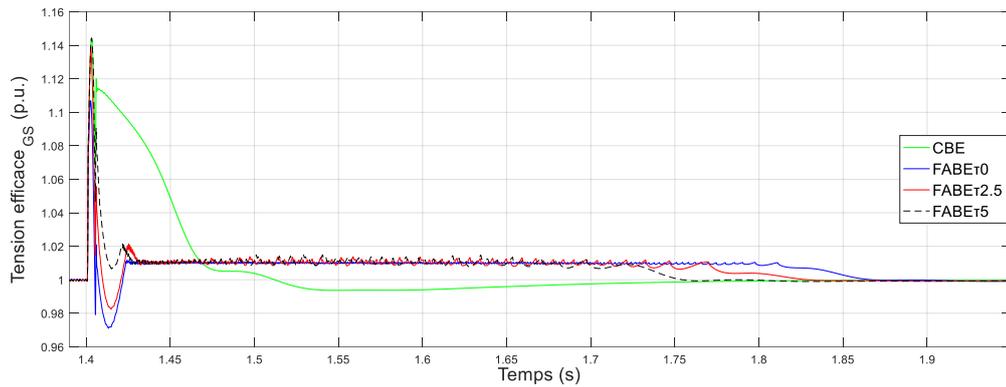


Figure 21: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge  $100_{0,8}$  pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas.

5.2 Charge  $100_{0,3}$

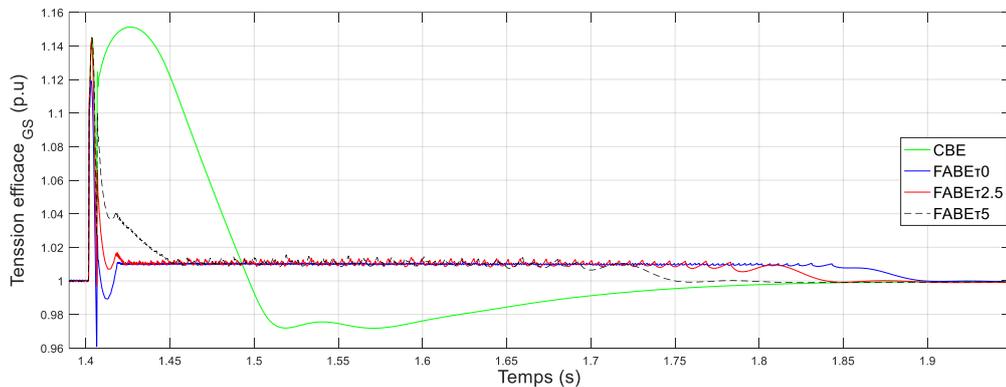


Figure 22: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge  $100_{0,3}$  pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas.

5.3 Charge  $100_{0,6}$

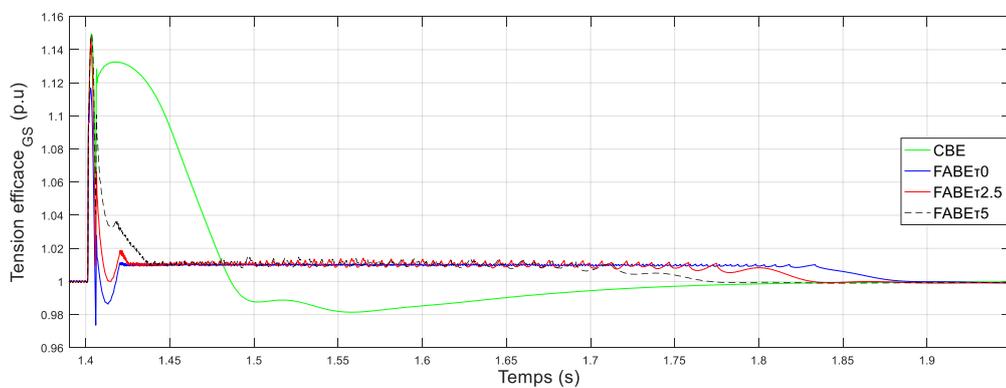


Figure 23: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge  $100_{0,6}$  pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas.

### 5.4 Charge 150<sub>0.8</sub>

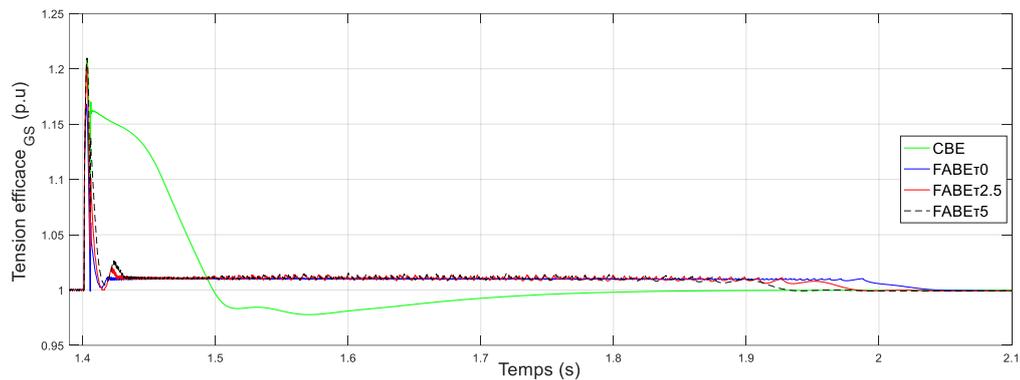


Figure 24: Tension efficace du générateur lors de délestage d'une charge 150\_0.8 pour différentes constantes de temps du filtre passe-bas.

Tout d'abord, nous pouvons voir que le système FABE effectue pour différentes charges (100<sub>0.8</sub>, 100<sub>0.3</sub>, 100<sub>0.6</sub> et 150<sub>0.8</sub>), une récupération rapide de la tension nominale du générateur (tension de référence  $U1_{ref}$ ), cependant, si les temps de réponse de la structure de transmission du signal de commande augmentent, les dépassements de tension (valeur de crête) augmentent et les temps des réponses aussi. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser un système de transmission rapide afin de maintenir les performances du système FABE.

## 6 Comparaison qualitative et quantitative entre les deux systèmes d'excitation

Les figures 25, 26 et le tableau 10 montrent une comparaison quantitative entre les différents résultats,  $\Delta t_d$  (ms) et  $\Delta U_d$  (%) désignent respectivement le temps de réponse et le dépassement de tension obtenus lors des tests de délestage, le temps de réponse est mesuré à 0.5% de la valeur de consigne, ajoutant à cette comparaison, pour le tableau les différents constantes de temps des structures de transmission du signal de commande

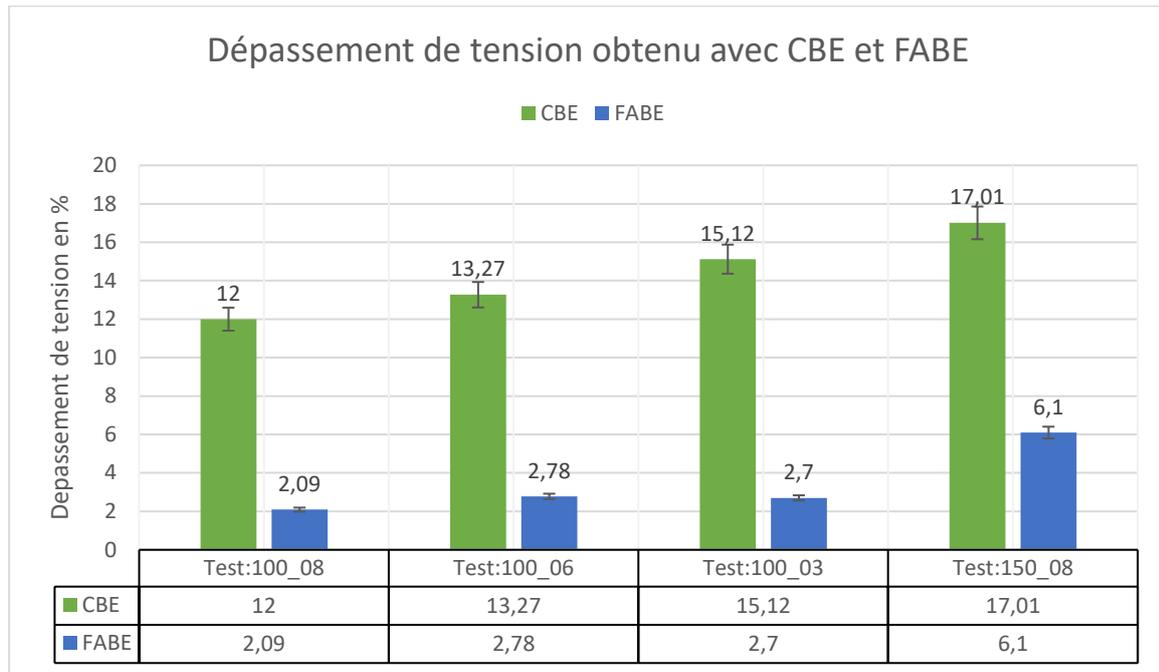


Figure 25: Dépassement de tension en (%) obtenu avec CBE et FABE par rapport à la valeur nominale (tension de référence).

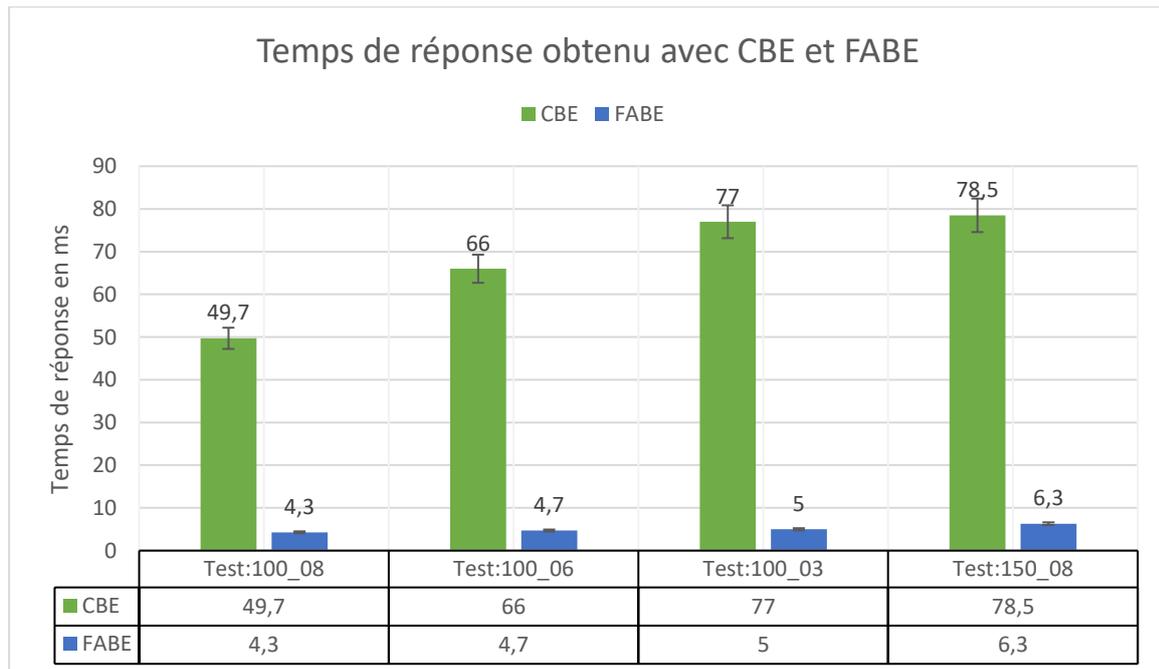


Figure 26: Temps de réponse obtenu avec CBE et FABE à 0.5% de la valeur de consigne (tension de référence).

Selon les figures 25 et 26, le système d'excitation FABE donne les meilleurs résultats et améliore considérablement les performances de régulation de tension du GS.

Par exemple, lors du test de délestage de 100<sub>0,8</sub>, le dépassement de tension est d'environ 2.09% dans FABE et de 12% dans le CBE, de plus le temps de réponse est réduit de 49.7 ms pour CBE à 4.3 ms pour FABE.

Tableau 10: Résultats des tests de délestage de charge.

Test	100_0.8		100_0.3		100_0.6		150_0.8	
	$\Delta t_d$	$\Delta U_d$						
	(ms)	(%)	(ms)	(%)	(ms)	(%)	(ms)	(%)
CBE	49.7	12	66	15.12	77	13.27	78.5	17.01
FABE $\tau_0$	4.3	2.09	5	2.7	4.7	2.78	6.3	6.1
FABE $\tau_{2.5}$	6	5.57	7.2	6.6	6.8	6.62	8.2	10.11
FABE $\tau_5$	7.7	9.06	10.5	10	9.8	10.05	10.2	13.81

Le tableau 10 montre quantitativement l'influence du temps de réponse de la structure de transmission du signal de commande sur les performances du système. Par exemple, lors du test de délestage de 100<sub>0.3</sub> le dépassement de tension est d'environ 2.7% dans le FABE $\tau_0$  et il augmente à 6.6% dans le FABE $\tau_{2.5}$  et ça continue d'augmenter pour FABE $\tau_5$  avec une valeur de 10%, même chose avec le temps de réponse il est de 5ms a FABE $\tau_0$  et il augmente a 7.2ms dans le FABE $\tau_{2.5}$  et ça continue d'augmenter pour FABE $\tau_5$  avec une valeur de 10.5ms.

À l'issue de ces essais d'impact/délestage de charge, il en ressort que la nouvelle approche est très intéressante en termes de qualité de signaux de sortie. Un meilleur avantage peut être tiré de cette structure avancée en lui adjoignant une loi de commande performante telle que la commande floue. L'avantage de cette structure comme nous l'avons spécifié dans le chapitre précédent est la possibilité d'alimenter directement la roue polaire par des tensions positives et négatives, ce qui rend la commande très efficace sur tout en moment du délestage de la charge de la GP, cependant, une structure de transmission de signal de commande lente peut détériorer les principaux avantages du système Fabe lors d'un rejet de charge. Enfin, pour ce qui est du réglage du contrôleur flou, un bon compromis entre rapidité et stabilité est obtenu avec le réglage des paramètres du contrôleur flou (les gains, l'expression des règles, la méthode d'implication, la méthode d'inférence...), et le réglage des paramètres de la varistance (tension de protection, courant de référence par bloc, nombre de bloc).

**7 Conclusion**

La validation et la comparaison des deux structures d'excitation (classique et avancée floue) ont été faites à l'aide des essais d'impact/délestage de charge. Il en ressort que la structure d'excitation avancée floue que nous avons mise en place présente de réels avantages en termes de temps de réponse et dépassement relatif durant les tests de délestages, par rapport à la structure conventionnelle d'excitation. Ces résultats ont été obtenus en utilisant un meilleur réglage du contrôleur flou.

# *Conclusion générale*

### *Conclusion générale*

Ce travail de master s'est intéressé à l'amélioration des systèmes d'excitation/déexcitation des générateurs synchrones. Le but était d'améliorer les performances en termes de stabilité, dépassement de tension et temps de réponse. Grâce à ce travail, nous avons pu,

- Présenter les principes généraux des génératrices synchrones, ainsi que de leurs applications dans différents domaines,
- Exposer les structures d'excitation de machines synchrones les plus largement utilisées dans l'industrie (classique et avancée), ainsi que les différentes techniques de la régulation de tension des alternateurs.
- Analyser et comprendre le fonctionnement des structures d'excitations Brushless classique et avancée d'une génératrice synchrone, et les différents réglages utilisés,
- Développer et étudier une nouvelle loi de commande floue capable de contrôler l'enroulement principal de champ du générateur synchrone avec des tensions négatives,
- Faire la validation et la comparaison des deux structures d'excitation (classique et avancée floue), avec un simulateur sous Matlab qui permet de simuler le comportement réaliste de la machine durant les impacts/délestage de charge.
- Montrer que la commande floue que nous avons mise en place présente de réels avantages en termes de temps de réponse et dépassement relatif durant les tests de délestages, par rapport à la structure classique d'excitation.

À l'issue de ce travail plusieurs perspectives s'ouvrent, il serait alors intéressant de valider notre technique de commande floue expérimentalement.

### *Références bibliographiques*

- [1] E. Mouni. Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées. Thèse de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2008.
- [2] A. Barakat, Contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones : nouvelles structures d'excitation associées à des lois de commande  $H_\infty$ . Thèse de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2011.
- [3] K. Nøland, F. Evestedt, J. J. Pérez-Loya, J. Abrahamsson and U.Lundin, Comparison of Thyristor Rectifier Configurations for a Six-Phase Rotating Brushless Outer Pole PM Exciter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 2, 2017, pp. 968-976.
- [4] O.P. Malik, G.S. Hope, and M.A.L. Badr. A computer study of a pid automatic voltage regulator part ii: Digital pid voltage regulator with dynamically varying weighting parameters. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 4, 1983, pp. 972-980.
- [5] K. Kim and R.C. Schaefer, Tuning a PID Controller for a Digital Excitation Control System, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 2, 2005, pp. 485-492.
- [6] M. Gunes and N. Dogru, Fuzzy control of brushless excitation system for steam turbo generators, IEEE Trans. Energy Convers, vol. 25, no. 3, 2010, pp. 844-852.
- [7] M.M. Salem, O.P. Malik, A.M. Zaki, O.A. Mahgoub, E.A. El-Zahab, Simple neuro-controller with a modified error function for a synchronous generator, Int J Electr Power Energy Syst, Elsevier., vol. 25, 2003, pp. 759-771.
- [8] S. E. Chouaba, A. Barakat, Advanced Brushless Excitation System with Dynamic de-Excitation Capability International Review of Electrical Engineering (IREE) Vol. 14, No. 2, 2019.
- [9] E. Rebollo, F. R. Blaquez, C. A. Platero et al., Improved high-speed de-excitation system for brushless synchronous machines tested on a 20 MVA hydro-generator. IET Electric Power Applications (Volume : 11, Issue : 4 , pp495-503, 2017.
- [10] A. Soukkou, A. Khellaf, S. Leulmi, Supervision neuro-floue a apprentissage génétique d'un pid robuste SCIENCES & Technologie B– N°23, juin (2005), pp. 95-106.
- [11] A. Daoud, A. Midoun, Commande Floue de la Charge d'une Batterie dans une Installation Photovoltaïque Rev. Energ. Ren. : ICPWE (2003) pp.67-72.

### *Résumé*

La structure d'excitation et la loi de commande associée sont deux éléments principaux qui influencent le comportement dynamique des générateurs synchrones. Afin d'améliorer les performances de la régulation de tension en termes de stabilité. Le but de ce projet est de développer une nouvelle loi de commande capable de contrôler l'enroulement principal de champ du générateur synchrone avec des tensions négatives. Motivés par la capacité des systèmes flous pour la commande des systèmes très complexes à analyser et commander par les techniques conventionnelles, et en se basant sur des modèles de type Mamdani un contrôle dynamique de la structure de désexcitation est étudié avec un contrôleur négatif de type PD-Floue. Enfin, une comparaison avec une structure d'excitation conventionnelle a été faite afin d'évaluer aussi bien quantitativement que qualitativement l'apport effectif de ce travail. Ainsi en termes de dépassement de tension et temps de réponse, la nouvelle approche combinée à une loi de commande floue apporte une meilleure réponse par rapport aux structures classiques.

**Mots clés :** Générateur synchrone, structure d'excitation/désexcitation, Modélisation, Commande floue, Performances.

### *Abstract*

The excitation structure and the associated control law are two main elements that influence the dynamic behavior of synchronous generators. To improve the performance of voltage regulation in terms of stability. This project aims to develop a new control law capable of controlling the main field winding of the synchronous generator with negative voltages. Motivated by the ability of fuzzy systems to control very complex systems to analyze and control with conventional techniques, and based on Mamdani type models, dynamic control of the de-excitation structure is studied with a negative controller type PD-Fuzzy. Finally, a comparison with a conventional excitation structure was made to assess both quantitatively and qualitatively the actual contribution of this work. Thus, in terms of voltage overshoot and response time, the new approach combined with a fuzzy control law provides a better response compared to conventional structures.

**Keywords:** Synchronous Generator, Excitation / De-excitation structure, Modeling, Fuzzy control, Performances.