

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE GÉNIE

DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

KHALED OURAMDANE

**MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU SYSTÈME D'EXCITATION
DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR DU SIMULATEUR ANALOGIQUE
D'HYDRO-QUEBEC**

MAI 2015



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

Le présent mémoire porte sur la modélisation et l'optimisation du système d'excitation du groupe Turbine-Alternateur du Simulateur analogique d'Hydro-Québec. L'important rôle que joue la partie excitatrice dans l'ensemble des composantes du simulateur implique non seulement que cet élément assure la protection des autres éléments du groupe (la surtension par exemple aux bornes de l'alternateur), mais aussi sa propre protection (surintensité du circuit d'excitation par exemple). Il intervient aussi dans l'amélioration des performances dynamiques du simulateur tout en assurant sa fiabilité et sa durabilité.

Ce document présente en premier lieu : (1) une introduction générale, qui illustre l'intérêt de ce projet d'un point de vue socio-économique et éducatif, les objectifs visés ainsi que la méthodologie adoptée; (2) un état de l'art sur les systèmes d'excitations des génératrices synchrones; (3) les modèles mathématiques de chaque partie du groupe-turbine-alternateur sont développés, plus particulièrement le modèle du système d'excitation, avant de faire une introduction aux régulateurs conventionnel (4) souvent introduits au niveau de l'excitatrice; (5) une méthode d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques est présentée dans le but d'optimiser les paramètres du système d'excitation.

Les modèles élaborés de chaque partie du groupe turbine-alternateur sont assemblés. En prenant les valeurs des paramètres de la littérature courante, (6) une validation sous matlab/simulink est effectuée, présentant ainsi les résultats de la régulation et d'optimisation sur le système global.

Abstract

This thesis focuses on the modeling and optimization of the excitation system of the group turbine-alternator Hydro-Québec's digital Simulator. The important role played by the exciter part in the whole components of the simulator implies that this element not only insures the protection of other elements of the group (overvoltage for example across the terminals of alternator), but also its own protection (overcurrent of the excitation circuit for example). It also involves in the improvement of the dynamic performances of the simulator while assuring its reliability and durability.

This document first presents a general introduction (1), which illustrates the interest of this project of a socioeconomic and educational point view, the objectives and methodology used; (2) the state of art in excitation systems of synchronous generators is presented; (3) the mathematical models of each part of the group slog alternator are developed, particularly the excitation systems models, before making an introduction for conventional regulators (4) often introduced at the exciter level. (5) The optimization method based on the genetic algorithms is presented in order to optimize the excitation system's parameters.

Developed models of each part of the turbine-alternator group are assembled. The validation of present work is made using matlab/simulink software and parameters values obtained from the literature. Results of the control and optimization of the global system's model are presented and discussed (6).

Remerciements

Ce mémoire a été réalisé à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) avec l'aide et le soutien de nombreux intervenants clés qui ont grandement contribué à sa réalisation. Aussi, je tiens à les remercier et à leur exprimer toute ma reconnaissance ;

En premier lieu, mon directeur de recherche, le Professeur René Wamkeue (ing. Ph.D), professeur titulaire à l'UQAT, pour m' avoir proposé ce sujet, pour son soutien permanent et les nombreux conseils et informations apportés. Ce dernier a grandement contribué à rehausser la qualité technique de ce travail.

M. Jean-Jacques Beaudoin, Professionnel, chargé des Laboratoires à l'UQAT, pour sa disponibilité et son savoir-faire technique, mis en contribution pour la compréhension de nombreux concepts pratiques.

Mes coéquipiers du groupe de recherche GREENG, pour leurs nombreuses suggestions lors de nos présentations.

Je dédie particulièrement ce mémoire à ma sœur aînée Ouiza que Dieu veuille sur son âme, à toute ma famille, à mon épouse et à Koceyla, et également à tous ceux qui n'ont pas été cités. Je remercie le Seigneur de m' avoir permis d' accomplir ce projet.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des Figures.....	x
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des symboles.....	xviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Motivations et objectifs du travail.....	2
1.1.1 Motivations socio-économiques.....	3
1.1.2 Objectif général.....	7
1.1.3 Objectifs spécifiques.....	7
1.2 Méthodologie et organisation du projet.....	8
1.3 Conclusion.....	10
CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES D'EXCITATION..	11
2.1 Introduction.....	11

2.2	Exigences d'un système d'excitation	11
2.3	Éléments d'un système d'excitation	13
2.4	Différents types de système d'excitation	15
2.4.1	Système d'excitation à courant continu (DC)	15
2.4.2	Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)	16
2.4.3	Systèmes d'excitation statique	18
2.5	Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation.....	20
2.5.1	Régulateurs AC et DC	21
2.5.2	Circuits de stabilisation d'un système d'excitation.....	21
2.5.3	Stabilisateur de puissance (PSS)	22
2.5.4	Compensateur de charge	23
2.6	Conclusion	24
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DES SOUS-ENSEMBLES DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR		25
3.1	Introduction	25
3.2	Modélisation de la génératrice synchrone.....	26
3.2.1	Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc	26
3.2.2	Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dq0)....	28
3.2.3	Développement du modèle hybride de la génératrice synchrone.....	34
3.3	Modèle de la turbine hydraulique et servomoteur.....	38

3.4	Modélisation du système d'excitation statique	40
3.4.1	Modèle par la méthode DQ	40
3.4.2	Modèle IEEE type ST.....	55
3.5	Conclusion	62
CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉGULATEURS CONVENTIONNELS D'UN GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR		63
4.1	Introduction.....	63
4.2	Régulateur automatique de tension.....	63
4.2.1	Régulation et stabilisation de la tension d'excitation	64
4.2.2	Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone :.....	66
4.3	Régulation de la vitesse de rotation	74
4.4	Stabilisateur de puissance	76
4.5	Conclusion	78
CHAPITRE 5 OPTIMISATION PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE		79
5.1	Introduction.....	79
5.2	Technique d'optimisation par algorithmes génétiques	80
5.2.1	Principe de base d'un AG standard	81

5.2.2	Codage des variables dans un AG.....	83
5.2.3	Opérateurs d'un algorithme génétique	83
5.2.3.1	Opérateur de sélection.....	84
5.2.3.2	Opérateur de croisement.....	84
5.2.3.3	Opérateur de Mutation.....	87
5.3	Optimisation mono objectif	88
5.4	Conclusion	90

CHAPITRE 6 TESTS ET VALIDATION DE LA RÉGULATION (AVR, PID) ET DE L'OPTIMISATION PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE DES PARAMÈTRES D'EXCITATION DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR
..... **91**

6.1	Introduction.....	91
6.2	Paramètre des différents blocs	92
6.3	Régulation de la tension d'excitation.....	94
6.4	Régulation de la tension de sortie de la génératrice.....	95
6.5	Régulation des tensions dans le système global.....	97
6.6	Tests et simulations sur le système global	99
6.6.1	Test d'amorçage des tensions de sortie	99
6.6.2	Tests - réponse à une variation de tension.....	100
6.7	Régulation de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique	105

6.8	Stabilisation de puissance	108
6.9	Optimisation des paramètres du système d'excitation	112
6.9.1	Optimisation des paramètres de l'AVR.....	114
6.9.2	Optimisation des paramètres du régulateur PID.....	115
6.9.3	Tests et Simulation sur le système global après optimisation	116
6.9.3.1	Réponse à un échelon unitaire.....	117
6.9.3.2	Réponse à une variation de tension	119
6.10	Conclusion	121
CONCLUSION GÉNÉRALE		122
Références	125	
Annexe 1	129	
Annexe 2	130	
Annexe 3	135	
Annexe 4	135	
Annexe 5	138	
Annexe 6	140	
Annexe 7	142	
Annexe 8	142	

Annexe 9	143
Annexe 10	144
Annexe 11	149
Annexe 12	150

Liste des Figures

Figure 1-1	Schéma représentatif du simulateur analogique d'Hydro-Québec .	3
Figure 1-2	Production d'énergie aux États-Unis en 2013 – au Canada et au Québec en 2012	4
Figure 1-3	Comparaison des prix moyens de l'électricité pour les clients résidentiels des grandes villes en Amériques du Nord [4].....	5
Figure 1-4	Émission de gaz à effet de serre de différentes filières de production [4]	6
Figure 1-5	Schéma descriptif du projet	10
Figure 2-1	Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone [1].....	13
Figure 2-2	Système d'excitation de type DC.....	16
Figure 2-3	Excitation de type AC avec redresseur non commandé	17
Figure 2-4	Excitation type AC avec redresseur commandé	17
Figure 2-5	Système d'excitation de type Brushless.....	18
Figure 2-6	Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [1].....	19

Figure 2-7	Système d'excitation muni de circuits de protection	20
Figure 2-8	Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation [1] [2]	22
Figure 2-9	Schéma du compensateur de charge [1].....	23
Figure 3-1	Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc) .	28
Figure 3-2	Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel $dq0$)....	29
Figure 3-3	Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu)	33
Figure 3-4	Illustration des entrées-sorties du modèle hybride de la génératrice	34
Figure 3-5	Schéma fonctionnel des états (flux).....	36
Figure 3-6	Schéma fonctionnel des sorties (ψ_s, V_s).....	37
Figure 3-7	Schéma du convertisseur commandé lié au réseau	40
Figure 3-8	Circuit équivalent du redresseur commandé dans le repère dq	41
Figure 3-9	Circuit électrique équivalent du redresseur commandé lié au réseau dans le repère dq [19].....	43
Figure 3-10	Convertisseur avec régulateurs	46
Figure 3-11	Régulation par PI.....	46

Figure 3-12	Circuit électrique équivalent du convertisseur régulé [20].....	47
Figure 3-13	Tension de sortie $V_f(\alpha = 10^0)$	50
Figure 3-14	Tension de sortie $V_f(\alpha = 15^0)$	51
Figure 3-15	Calcul des paramètres K_{pi} et K_{ii}	52
Figure 3-16	Calcul des paramètres K_{pv} et K_{iv}	52
Figure 3-17	Tension de sortie V_f régulée.....	53
Figure 3-18	Modèle de l'amplificateur.....	56
Figure 3-19	Système d'excitation et transformateur de stabilisation [1].....	56
Figure 3-20	Fonctionnement des limitations.....	58
Figure 3-21	Fonctions de déclenchement (Gate).....	60
Figure 3-22	Structure du modèle détaillé du système d'excitation.....	60
Figure 3-23	Modèle IEEE du système d'excitation statique type ST1A.....	61
Figure 4-1	Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine-alternateur [1] [25] [26]	64
Figure 4-2	Système d'excitation type ST1 de IEEE.....	65
Figure 4-3	Régulation et stabilisation de la tension d'excitation	65

Figure 4- 4	Régulation de la tension de sortie de la génératrice.....	66
Figure 4-5	Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique.....	66
Figure 4-6	Schéma de régulation de tension simplifié.....	67
Figure 4-7	Principe de la régulation de la vitesse.....	74
Figure 4-8	Régulateur de vitesse type PID.....	75
Figure 4-9	Schéma bloc du Servomoteur.....	75
Figure 4-10	Système d'excitation type ST1 avec PSS.....	76
Figure 4-11	Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS1A.....	77
Figure 4-12	Schéma de la régulation globale.....	77
Figure 5-1	Organigramme d'un AG standard.....	82
Figure 5-2	Croisement en 1 point (codage binaire).....	86
Figure 5-3	Croisement en 2 points (codage binaire).....	86
Figure 5-4	Croisement uniforme (codage binaire).....	86
Figure 5-5	Représentation d'une mutation de bit dans une chaîne (codage binaire).....	88
Figure 6-1	Régulation et stabilisation de l'excitation.....	94

Figure 6-2	Tension d'excitation V_{FD}	94
Figure 6-3	Régulation de la tension génératrice V_S	95
Figure 6-4	Tension génératrice V_S	95
Figure 6-5	Tension d'excitation correspondante V_{FD}	96
Figure 6-6	Représentation schématique du système global (Génératrice + Excitation).....	97
Figure 6-7	Tension de sortie de la génératrice V_{Sabc}	98
Figure 6-8	Tension d'excitation V_{FD} correspondante	98
Figure 6-9	Tension de sortie de la génératrice V_{Sabc}	99
Figure 6-10	Tension d'excitation V_{FD} correspondante	99
Figure 6-11	Puissances au rotor.....	100
Figure 6-12	Tension d'excitation V_{FD} et tension de sortie V_{Sabc}	101
Figure 6-13	Puissances au niveau du rotor	101
Figure 6-14	Puissances au niveau stator.....	102
Figure 6-15	Tension d'excitation V_{FD} et tension de sortie V_{Sabc}	102
Figure 6-16	Puissances au niveau du rotor	103

Figure 6-17	Puissances au niveau du stator.....	103
Figure 6-18	Régulateur de vitesse type PID.....	105
Figure 6-19	Vitesse de rotation de la turbine ω_r et puissance mécanique P_m	106
Figure 6-20	Ouverture de vannage g et débit d'eau q associés	107
Figure 6-21	L'écart de vitesse $\omega - \omega_{ref}$	107
Figure 6-22	Schéma de la régulation globale	108
Figure 6-23	Variation de la tension d'excitation V_{FD} avec et sans PSS.....	109
Figure 6-24	Variation des puissances au niveau du rotor avec et sans PSS....	109
Figure 6-25	Tension V_{FD}	110
Figure 6-26	Puissances au rotor.....	110
Figure 6-27	Tension de stabilisation V_{Stab}	111
Figure 6-28	Tension d'excitation V_{FD} - avant et après optimisation	114
Figure 6-29	Tension V_S – avant et après optimisation.....	115
Figure 6-30	Tension génératrice V_{Sabc} (après optimisation).....	117
Figure 6-31	Tension d'excitation V_{FD} associée (après optimisation).....	117
Figure 6-32	Variation des puissances au rotor	118

Figure 6-33	Puissances au stator	118
Figure 6-34	Tension d'excitation V_{FD} et Tension génératrice V_{Sabc}	119
Figure 6-35	Variation des puissances au rotor	120
Figure 6-36	Variation des puissances au stator.....	120

Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres de la génératrice synchrone Labvolt	92
Tableau 2: Paramètres du système d'excitation statique ST1	93
Tableau 3 : Paramètres de la turbine hydraulique	93
Tableau 4 : paramètres du régulateur automatique de tension AVR.....	114
Tableau 5 : paramètres du régulateur PID.....	115
Tableau 6 : paramétrés optimaux du système d'excitation ST1.....	116

Liste des symboles

ST	-	Statique
AC	-	Courant alternatif
DC	-	Courant continu
AVR	-	Régulateur Automatique de tension
PSS	-	Stabilisateur de puissance
K_f	-	Gain de compensation de l'excitatrice ST
T_f	-	Constante de temps du compensateur
K_A	-	Gain de l'amplificateur de l'excitatrice ST
T_A	-	Constante de temps de l'amplificateur
v_a, v_b, v_c	V/pu	Tensions au stator repère abc
v_d, v_q	V/pu	Tensions des amortisseurs d et q
v_f	V/pu	Tension de champ
i_a, i_b, i_c	A/pu	Courants au stator repère abc
i_d, i_q	A/pu	Courants axe d et q
i_f	A/pu	Courant de champ
ψ_a, ψ_b, ψ_c	Wb/pu	Flux au stator repère abc
ψ_d, ψ_q	Wb/pu	Flux axe d et q
ψ_f	Wb/pu	Flux de champ

$P(\theta)$	-	Matrice de Park
$P^{-1}(\theta)$	-	Matrice de Park inverse
R_s	Ω/pu	Matrice résistance au stator
R_r	Ω/pu	Matrice résistance au rotor
$r_d = r_q = r_a$	Ω/pu	Résistances d'armature axe d et q
r_f, r_D, r_Q	Ω/pu	Résistances de champ, d'amortisseurs D et Q
v_s^{abc}, v_s^{dq0}	V	Vecteurs tension au stator
v_r^{abc}, v_r^{dq0}	V	Vecteurs de tension au rotor
i_s^{abc}, i_s^{dq}	A	Vecteurs courant au stator
i_r^{abc}, i_r^{dq0}	A	Vecteurs courant au rotor
$\psi_s^{abc}, \psi_s^{dq0}$	wb	Vecteurs flux au stator
$\psi_r^{abc}, \psi_r^{dq0}$	wb	Vecteurs flux au rotor
ω_m	rad/s	Vitesse de synchronisme
θ	rad	Angle
L_{ss}, L_{rr}, L_{sr}	H	Matrices des inductances mutuelles
X_{ss}, X_{rr}, X_{sr}	pu	Matrices des réactances mutuelles
x_d, x_q	pu	Réactances propres d'axe d et q
x_{md}, x_{mq}	pu	Réactances de magnétisation d'axe d et q
x_{kfl}	pu	Réactance de kany

x_f	pu	Réactance de fuite
V_{sref}	V	Tension de base
I_{sref}	A	Courant de base
S_{ref}	VA	Puissance de base
ω_{ref}	rad/s	Vitesse de référence
Ψ_{ref}	wb	Flux de référence
Z_{ef}	Ω	Impédance de base
H	pu	Constante d'inertie
T_M	pu	Couple mécanique
D	-	Coefficient d'amortissement
T_e	pu	Couple électrique
V_s, V_r	pu	Vecteur tension au stator et rotor
I_s, I_r	pu	Vecteur courant au stator et rotor
Ψ_s, Ψ_r	pu	Vecteur flux au stator et rotor
ω_n	pu	Pulsation propre
g	-	Vannage
q	-	Débit d'eau
P_m	-	Puissance mécanique
A_t	-	Gain de la turbine

T_W	S	Temps d'établissement du débit nominal
T_a	-	Constante de temps du servomoteur
K_a	-	Gain du servomoteur
u	-	Commande du servomoteur
CPL	-	Charge idéale
P_{CPL}	Kw	Puissance à travers CPL
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	V	Tensions de source triphasée en repère abc
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	Ω, H, F	Impédances équivalentes à l'entrée
r_F, L_F, C_F	Ω, H, F	Impédances liées au filtre à la sortie
I_{CPL}	A	Courant à travers la charge CPL
V_f	V	Tension aux bornes de la charge CPL
$V_{bus,a}, V_{bus,b}, V_{bus,c}$	V	Tensions de bus d'entrée en repère abc
$V_{bus,d}, V_{bus,q}$	V	Tensions de bus d'entrée en repère dq
E_{dc}, E_{dc1}	V	Tensions de sortie du convertisseur
I_a, I_b, I_c	A	Courants d'entrée en repère abc
I_d, I_q	A	Courants d'entrée en repère dq
I_{dc}	A	Courant à la sortie du convertisseur
λ	rad	Déphasage
S_{abc}	-	Matrice de passage dans le repère abc

S_{abc}^T	-	Matrice de passage inverse, repère abc
α	rad	Angle d'amorçage des thyristors
ϕ	rad	Angle de phase des tensions de bus
ϕ_1	rad	Angle de phase dans le repère dq
$T[\theta(t)]$	-	Matrice de transformation
S_{dq}	-	Matrice de passage dans le repère dq
S_{dq}^T	-	Matrice de passage inverse dans le repère dq
V_{sd}, V_{sq}	V	Tension de source dans le repère dq
I_{ds}, I_{qs}	A	Courants de source dans le repère dq
V_f^*	V	Consigne de la tension de sortie
I_{dc}^*	A	Consigne du courant de sortie
K_C	-	Facteur de rectification de tension
V_{FD}	pu	Tension d'excitation
K_E	pu	Gain de l'excitatrice
T_E	-	Constante de temps de l'excitatrice
K_{LR}	-	Facteur de rectification du courant
V_{Amax}, V_{Amin}	pu	Limitation de tension
T_C, T_{CI}, T_B, T_{BI}	-	Constante de temps du compensateur
V_{stab}	pu	Tension de stabilisation

V_{REF}	pu	Tension génératrice de référence
V_C	pu	Tension corrigée
I_{FD}	pu	Courant d'excitation
PID	-	Régulateur classique
K_P	-	Gain proportionnel du PID
K_I	-	Gain intégral du PID
K_D	-	Gain dérivée du PID
R_p	-	Statisme
w	pu	Vitesse de rotation
w_{ref}	pu	Vitesse de rotation de référence
AG	-	Algorithme Génétique
f	-	Fonction objective
P_c	-	Probabilité de croisement
P_m	-	Probabilité de mutation
F	-	Fonction d'adaptation

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La plus part des centrales hydroélectriques au Québec innovent et œuvrent afin d'assurer l'intérêt de tous en matière de production d'énergie électrique. A cet effet, le projet de construction d'un simulateur de centrale hydroélectrique groupe turbine-alternateur a été lancé chez Hydro-Québec en collaboration avec l'École de Génie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, dans le but de former du personnel technique destiné à œuvrer dans ce secteur. Le projet intitulé : « Modélisation et Optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur d'Hydro-Québec » vise l'étude d'un élément important et fondamental dans le fonctionnement du groupe turbine-alternateur qui est essentiellement le système d'excitation ou excitatrice.

Cependant, le système d'excitation est élaboré en accord avec les exigences des cahiers de charges, et pour se faire, on utilise des correcteurs en vue de contrôler les tensions de sortie des machines. En effet, l'amplitude de ces tensions dépend intégralement du champ tournant principal; l'idée est donc, en fonction de l'état de la machine synchrone utilisée, d'adapter le champ inducteur pour garder une amplitude constante en sortie. Pour cela, la principale contrainte est généralement son immunité vis-à-vis des perturbations extérieures (charge, délestage) et intérieures (variations des paramètres).

En outre, l'utilisation de l'excitatrice au niveau de l'inducteur présente quelques exigences par rapport au fonctionnement de la machine synchrone ainsi que sur le réseau électrique, à savoir :

- La fiabilité de l'excitatrice et sa capacité à amortir les oscillations de puissance au niveau de la génératrice [1].
- L'amélioration de la qualité des signaux, qui présente souvent des taux de distorsion assez importants.
- L'assurance des limitations nécessaires en cas de surcharges; le courant d'excitation de l'inducteur principal peut être limité par la tension de sortie de la machine via les circuits limiteurs de l'excitatrice [1] [2].

1.1 Motivations et objectifs du travail

En plus des apports pédagogiques que le simulateur d'Hydro-Québec (Figure 1-1) peut offrir en termes d'éducation et d'apprentissage dans le domaine de génie et plus précisément dans la production d'énergie électrique en centrales hydroélectriques, une formation beaucoup plus facile et pratique aux étudiants en génie. La mise en place du simulateur est également motivée par des enjeux socio-économiques assez importants.

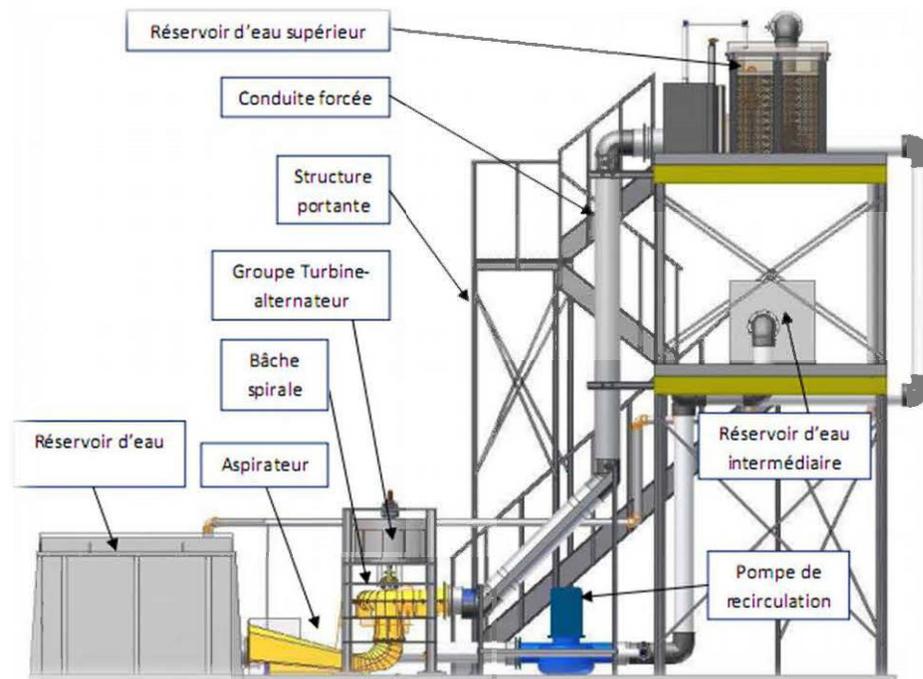


Figure 1-1 Schéma représentatif du simulateur analogique d'Hydro-Québec

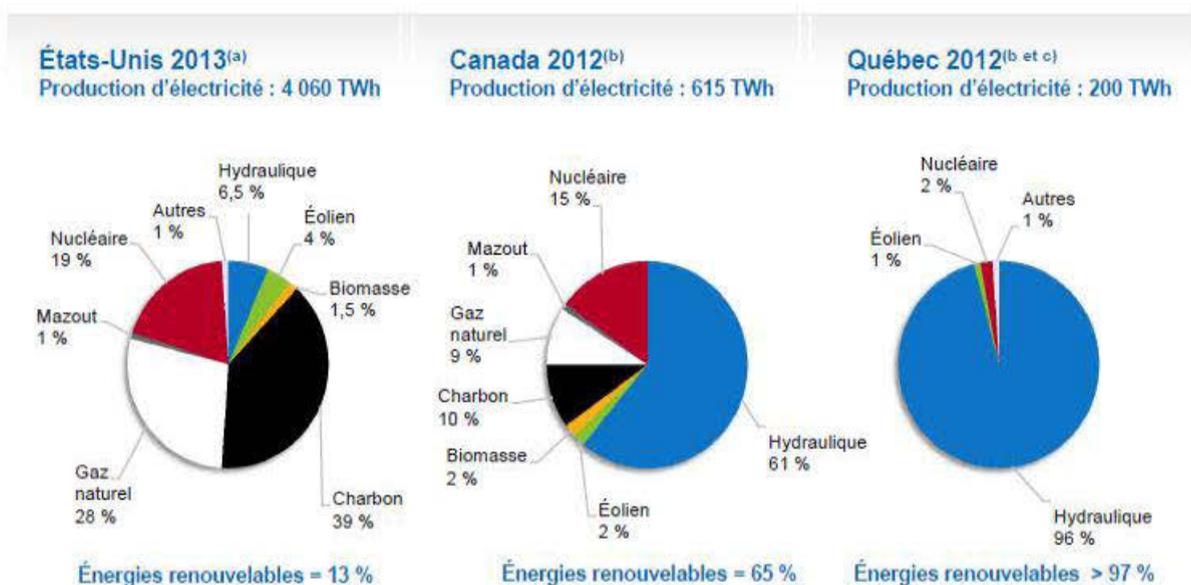
1.1.1 Motivations socio-économiques

Le Québec est la terre de l'hydroélectricité. Grâce à sa géomorphologie et à ses ressources hydroélectriques, le Québec a accès à une forme d'énergie propre, renouvelable, abondante et constante.

Avec plus de 130 000 cours d'eau et 500 000 lacs, qui représentent au total 12 % de son territoire, le Québec est l'une des régions les plus riches en eau du monde, et contient plus de 40 % des ressources hydrauliques du Canada [3]. Cette spécificité

constitue un réel atout dont le gouvernement québécois a su tirer profit, en faisant du développement de la filière hydroélectrique une priorité de sa stratégie énergétique. L'aménagement de la Baie-James en est l'exemple le plus illustre, puisque celle-ci abrite aujourd'hui le plus grand complexe hydroélectrique au monde.

96 % de l'électricité produite au Québec provient de l'énergie hydroélectrique (Figure 1-1) [3] [4]. L'entreprise d'État, Hydro-Québec, gère d'immenses ensembles de barrages, qu'elle peut ouvrir ou fermer instantanément pour ajuster l'offre à la demande. L'électricité est donc abondante, propre et surtout constante, contrairement aux autres énergies renouvelables généralement intermittentes.



Sources : (a) Energy Information Administration, 2014 – (b) Statistique Canada, 2014 – (c) Hydro-Québec, 2013

Figure 1-2 Production d'énergie aux États-Unis en 2013 – au Canada et au Québec en 2012

L'électricité est tellement bon marché au Québec que 70 % des foyers se chauffent par ce moyen en hiver. Le prix de l'électricité est en outre le même partout, par

péréquation (Figure 1-2), que l'on se situe dans la communauté inuit du nord ou en plein centre de Montréal, le tarif pratiqué est plat; ni dégressif, ni progressif.

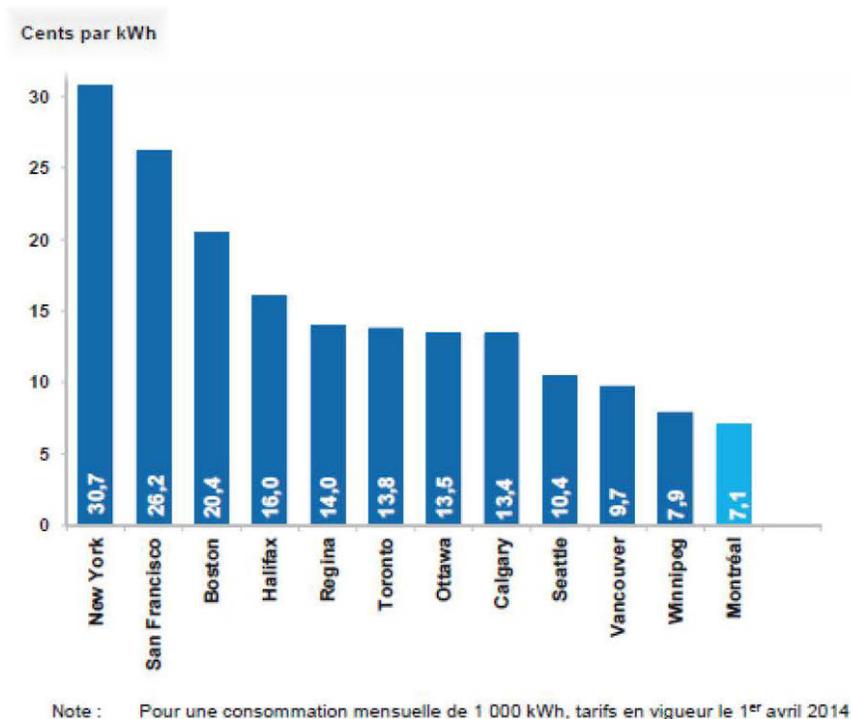


Figure 1-3 Comparaison des prix moyens de l'électricité pour les clients résidentiels des grandes villes en Amériques du Nord [4]

Grâce à ses ressources hydrauliques, le Québec bénéficie donc d'un actif non négligeable, qui prend une valeur additionnelle dans un contexte de lutte contre les gaz à effet de serre (Figure 1-3). Avec cette prépondérance de l'hydroélectricité dans son mix énergétique, le Québec produit deux fois moins de gaz à effet de serre par habitant que l'ensemble du Canada.

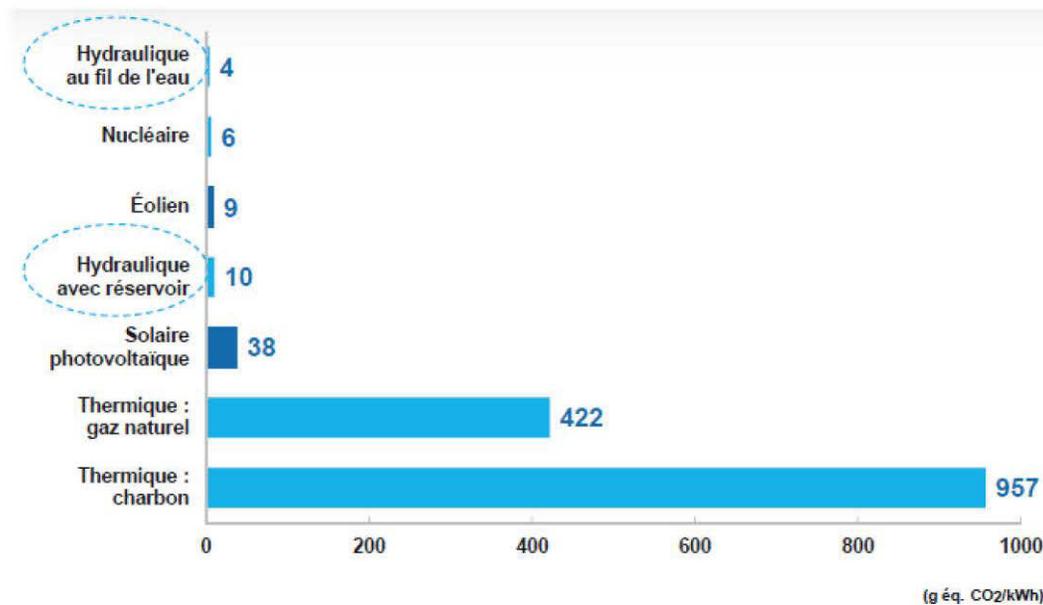


Figure 1-4 Émission de gaz à effet de serre de différentes filières de production [4]

Par conséquent, l'immense importance économique qu'occupe l'hydroélectricité au Québec, encourage d'avantage le principal fournisseur en électricité, Hydro-Québec à œuvrer pour l'établissement du simulateur analogique, qui certainement, contribuera non seulement dans le développement du secteur hydroélectrique provincial, mais aussi assurera le relais entre universitaire et industriel en termes de progrès et d'innovation (sachant que plusieurs essais et tests pourront être effectués sur le simulateur analogique indépendamment du réseaux électrique).

1.1.2 Objectif général

Le but principal visé, étant d'assurer une meilleure qualité et fiabilité des alimentations électriques tout en garantissant une solide protection des équipements électriques; soit de la génératrice synchrone, la turbine hydraulique, et éventuellement du réseau électrique au niveau du simulateur d'Hydro-Québec. Cela en agissant seulement sur la partie excitation du groupe.

1.1.3 Objectifs spécifiques

Les objectifs qui sont spécifiquement visés, dans cette étude peuvent être illustrés comme suit :

- Élimination des perturbations extérieures (charges, délestages,...etc) via des contrôleurs ou régulateurs bien spécifiques introduits au niveau de l'excitatrice.
- Optimisation des paramètres du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur d'Hydro-Québec.
- Assurance d'une meilleure stabilité, rapidité et précision au niveau de la tension génératrice en optimisant les différents paramètres de l'excitatrice par la méthode d'optimisation par algorithme génétique.
- Amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance de la génératrice.

1.2 Méthodologie et organisation du projet

Notre travail est structuré suivant quatre parties principales élaborées selon le cheminement ci-dessous :

- Revue de littérature :

Un État de l'art sur les systèmes d'excitation des génératrices synchrones sera présenté. Les différents types de systèmes d'excitations seront alors abordés, leurs utilisations, leurs fonctionnements et le rôle important qu'ils jouent dans un groupe turbine-alternateur (chapitre 2).

- Modélisation des sous ensembles du simulateur :

Avant de procéder aux essais et différents tests sur l'ensemble du simulateur analogique, groupe turbine-alternateur, la modélisation de chaque bloc est indispensable. Le modèle de la génératrice est alors présenté, puis adapté à la problématique du thème, à son tour la partie hydraulique du simulateur définie principalement par la turbine hydraulique est donnée sous le modèle très fréquent dans la littérature [5]. Et enfin, la modélisation du système d'excitation, qui présente la partie la plus importante dans notre travail, avant de faire l'assemblage et la mise en commun des différents modèles, dans un seul modèle global, cela permettra alors d'effectuer des essais et des simulations sur l'ensemble du système, ce qui conclut le chapitre 3.

- Régulation et contrôle des grandeurs de sortie :

Cette étape consiste, en la régulation via des contrôleurs bien choisis (PI, PD, PID, AVR, ...etc) qui seront introduits dans la partie excitatrice du système global définissant le groupe turbine alternateur, afin d'améliorer les performances dynamiques de l'ensemble du système. Le fonctionnement et le rôle de chaque régulateur est alors illustré et présenté dans le chapitre 4.

- Optimisation des paramètres du système d'excitation :

Une méthode d'optimisation appropriée sera choisie (algorithme génétique) et appliquée, afin de générer les résultats les plus optimaux de chaque paramètre du système d'excitation du simulateur analogique du groupe turbine-alternateur. La présentation de cette méthode d'optimisation est définie dans le chapitre 5.

Notre travail alors peut être représenté par le schéma descriptif de la Figure 1-5 montrée ci-dessous où sont résumées, les parties essentielles du projet.

La validation et les résultats obtenus sont alors présentés dans le dernier chapitre (6) avant de finir par une conclusion générale.

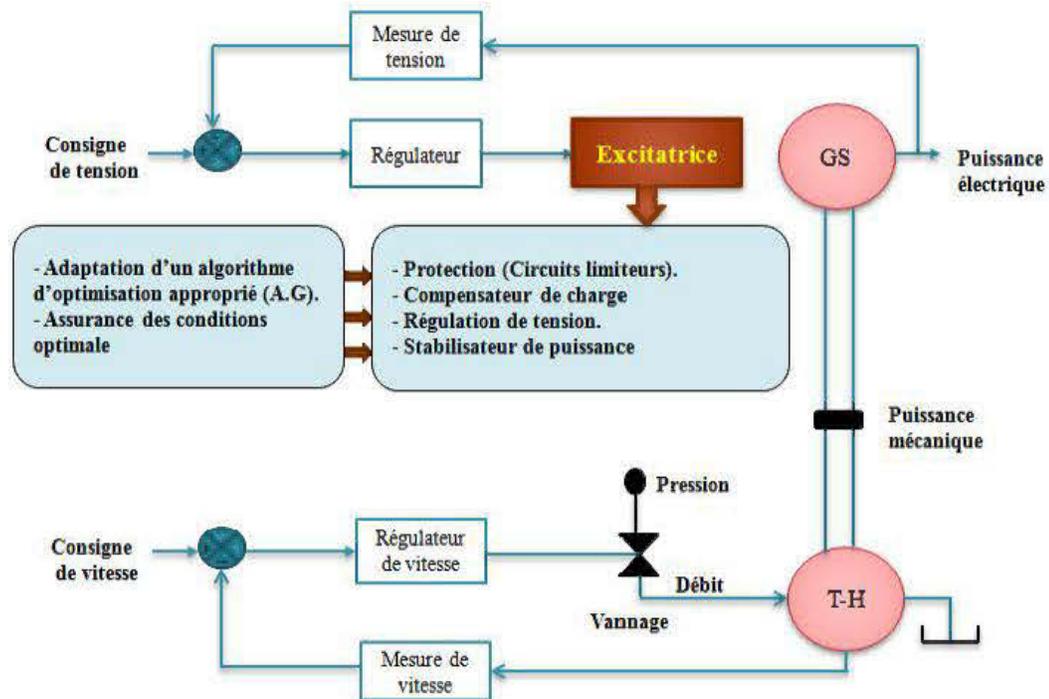


Figure 1-5 Schéma descriptif du projet

1.3 Conclusion

Ce chapitre nous a donné un aperçu introductif de notre travail de recherche, le situant dans le contexte socio-économique et éducatif, les motivations de ce projet et les objectifs visés ont été énumérés ainsi que la méthode adoptée dans la résolution de chaque partie du thème.

CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES D'EXCITATION

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie la plus importante dans notre travail, qui est définie par le système d'excitation du groupe turbine-alternateur. Avant d'aborder les éléments essentiels qui constituent un système d'excitation, nous allons discuter les exigences et nécessités pour le fonctionnement des systèmes d'excitations. Les différents types de systèmes d'excitations seront par la suite présentés suivant leurs utilisations. Le rôle et l'importance du système d'excitation dans un groupe turbine-alternateur est en principe la possibilité d'effectuer des opérations de commande, de régulation et de stabilisation dans le but d'assurer la protection des éléments dans chaque bloc du groupe. Les différents circuits de commande et de protection seront alors détaillés dans cette partie montrant alors l'utilité et la nécessité et le fonctionnement de chaque élément d'un système d'excitation; exciteur, régulateurs, stabilisateur, compensateur,...etc.

2.2 Exigences d'un système d'excitation

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

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

La fonction de base de l'excitation est alors de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone; de plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive [1] [6] [7], ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines), le tout par le biais de la tension d'excitation.

D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation devrait contribuer au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système [1] [8]. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux.

Historiquement, le rôle du système d'excitation dans l'amélioration des performances du système de production n'a pas cessé de se développer. Auparavant, les systèmes d'excitation intervenaient manuellement dans la régulation et le maintien constant de la tension et la puissance réactive en sortie des génératrices. Quant le contrôle de la tension génératrice a été automatisé la première fois, il était lent. Au début des années 1920, l'intégration des régulateurs continus dans les systèmes d'excitations a contribué dans le développement de ceux-ci, permis d'obtenir de meilleurs résultats, et suscité l'intérêt d'un grand nombre d'industriels. Depuis ce moment, le système d'excitation a connu une évolution continue. À partir des années 1960, l'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargis en utilisant des signaux de stabilisation auxiliaires. En plus de la régulation de tension de sortie, l'excitation permettait d'amortir les oscillations de puissance du système à l'aide de stabilisateur de puissance (*power system stabilizer*) [9] [10]. Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT) [1] [11].

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes [1] [12] :

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

2.3 Éléments d'un système d'excitation

Le schéma ci-dessous (Figure 2-1) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones.

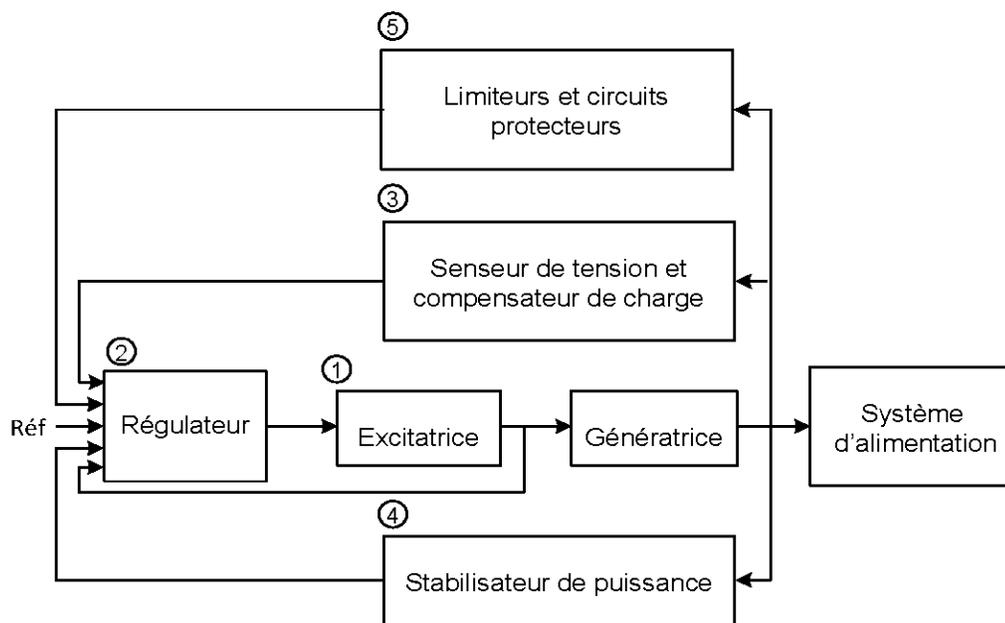


Figure 2-1 Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone [1]

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

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

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

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

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

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

2.4 Différents types de système d'excitation

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitations pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels [1] [13] :

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

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

2.4.1 Système d'excitation à courant continu (DC)

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

L'excitation à courant continu est la première utilisée de l'année 1920 jusqu'en 1960 où elle a été remplacé par l'excitation de type AC [1].

Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisé pour fin d'étude de la stabilité car il exige une modélisation complexe. Il est souvent remplacé par l'excitatrice de type AC ou l'excitatrice statique ST [1].

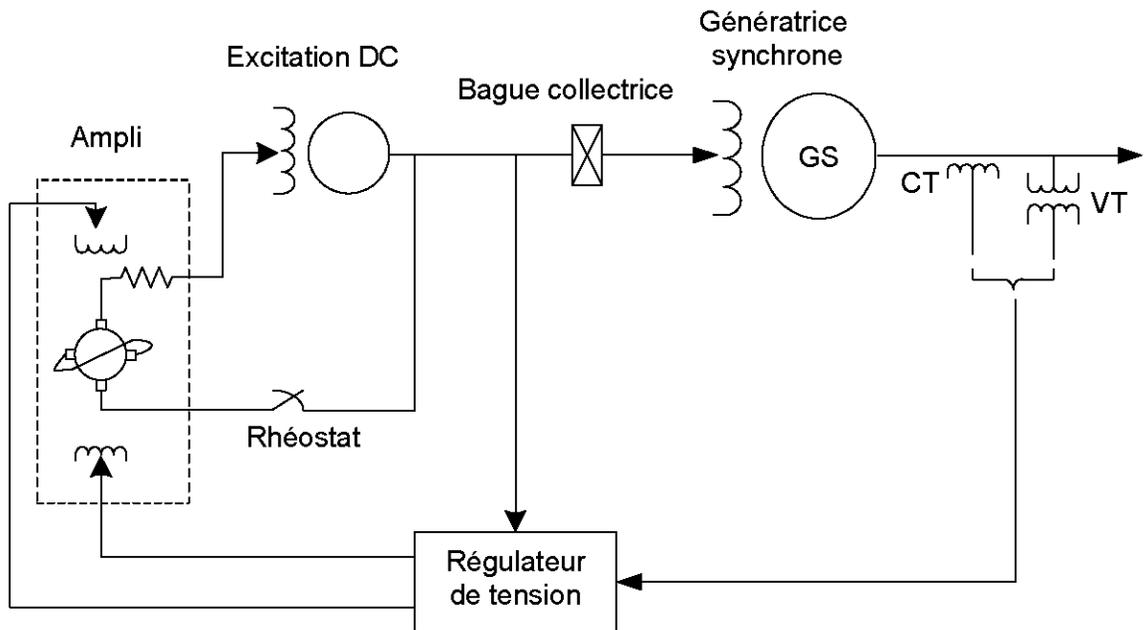


Figure 2-2 Système d'excitation de type DC

2.4.2 Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)

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

Les figures 2-3 et 2-4 montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

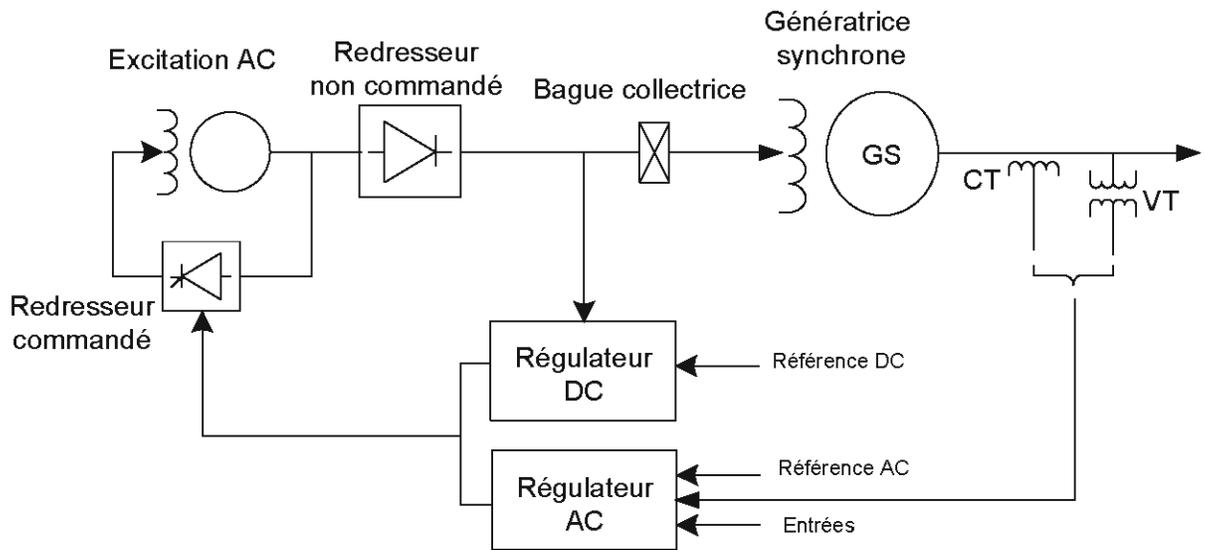


Figure 2-3 Excitation de type AC avec redresseur non commandé

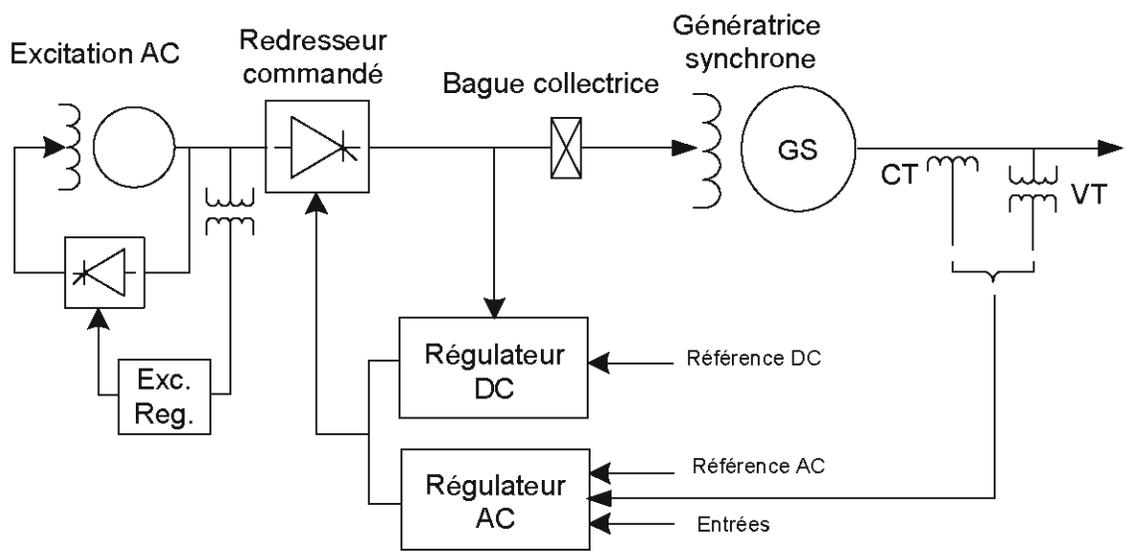


Figure 2-4 Excitation type AC avec redresseur commandé

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la machine synchrone. La Figure 2-5 illustre l'excitation AC de type *Brushless* où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante [1] [13].

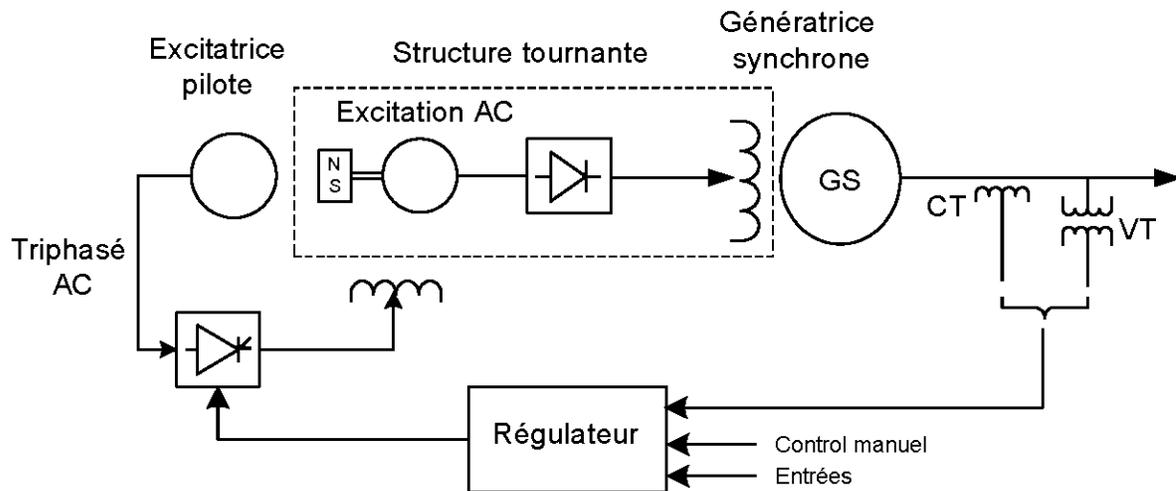


Figure 2-5 Système d'excitation de type Brushless

2.4.3 Systèmes d'excitation statique

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

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

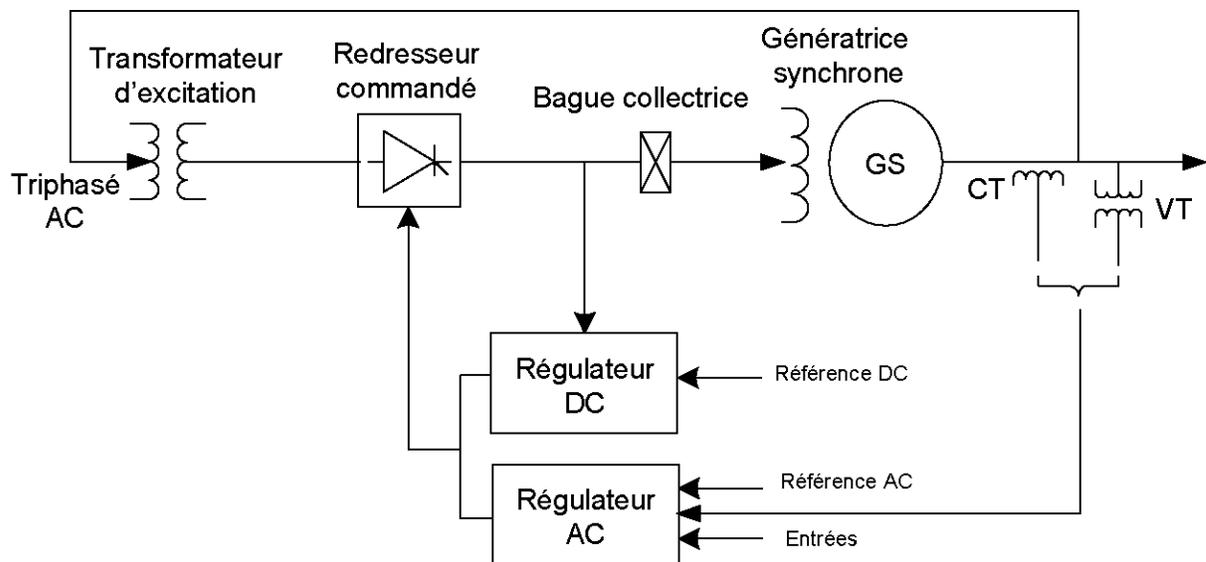


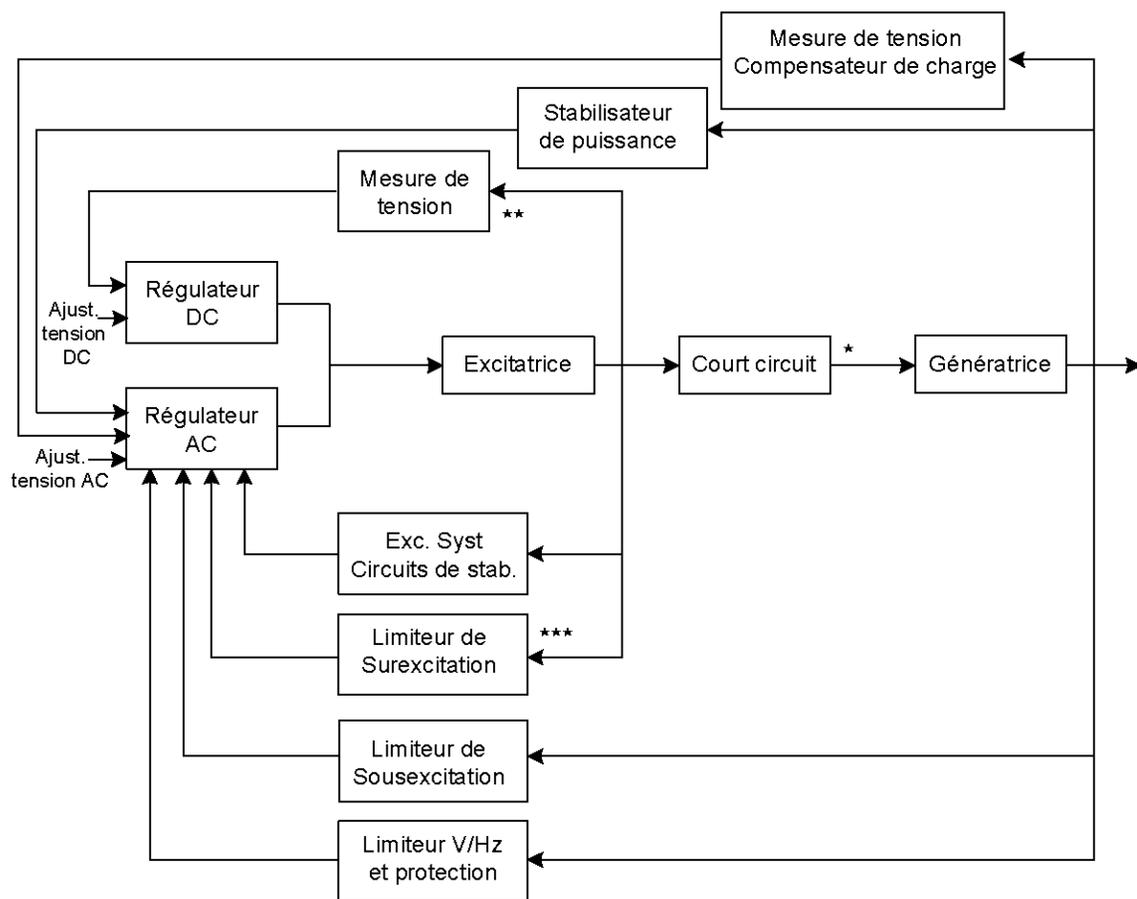
Figure 2-6 Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [1]

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (Figure 2-6) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques unes de ses caractéristiques :

- ✓ Pas de partie tournante à part la machine.
- ✓ Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- ✓ Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ...etc) [14].
- ✓ Moins coûteuse et facile à entretenir
- ✓ Plus adaptée pour les petites centrales hydroélectriques

2.5 Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation

La commande d'un système d'excitation ne dépend pas simplement du régulateur de tension, mais aussi des fonctions de limitation et de protection qui permettent de bien répondre aux exigences de performance présentées en section 2.2 [1] [12].



- * Court-circuit : Applicable pour l'excitatrice type ac et statique seulement
- ** Quelques systèmes ont un régulateur dc en boucle ouverte
- *** Limiteur surexcitation : peut être utilisé avec un régulateur dc

Figure 2-7 Système d'excitation muni de circuits de protection

La Figure 2-7 présente toutes les différentes fonctions et circuits de protection d'un système d'excitation. Cependant l'utilisation de ces fonctions n'est pas requise par les différents types de système d'excitation, mais elles sont distinctes d'un système à l'autre [8].

2.5.1 Régulateurs AC et DC

Le régulateur à courant alternatif (AC) contrôle la tension de sortie au niveau du stator de la génératrice synchrone, de plus il permet l'application d'autres contrôle et de fonctions protectrices, comme illustré dans la Figure 2-7.

Le régulateur à courant continu (DC) contrôle à son tour, la tension d'excitation. Souvent, il est défini par un régulateur automatique de tension (*AVR*) [15].

Par ailleurs, plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans le cas du courant alternatif, citant les correcteurs conventionnels (PI, PID,...), qui seront présentés dans le chapitre 4.

2.5.2 Circuits de stabilisation d'un système d'excitation

Les systèmes d'excitation comportent des circuits de stabilisation, qui interviennent souvent en cas d'instabilité du système causé par un important temps de réponse (le cas présent dans le système d'excitation de type DC ou AC) [6], ou lorsque le gain du régulateur de tension au stator est très faible. Le circuit de

stabilisation est caractérisé par une compensation additionnelle à la boucle de régulation pour améliorer la performance dynamique du système. La Figure 2-8 illustre la compensation la plus fréquente, qui est définie par une fonction de transfert sous la forme $\frac{sK_F}{1+sT_F}$. Les paramètres de la fonction de stabilisation peuvent alors s'ajuster pour assurer le bon fonctionnement du système.

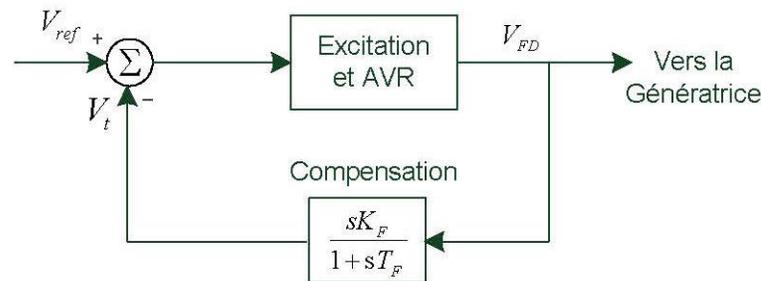


Figure 2-8 Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation [1] [2]

2.5.3 Stabilisateur de puissance (PSS)

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnels qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les grandeurs utilisées à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par : la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance [2] [16].

L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation, est souvent requise, car cet élément permet essentiellement l'amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité.

2.5.4 Compensateur de charge

Normalement, c'est le régulateur automatique de tension (*AVR*) qui assure le contrôle de la tension de sortie de la génératrice. Mais parfois, un compensateur de charge est aussi ajouté pour réguler la tension [1] [17]. Comme montré dans la Figure 2-9, le compensateur de charge est composé d'une résistance R_C et une réactance X_C en série, qui sont ajustables. En utilisant cette impédance, le courant des armatures I_t mesuré et la tension E_t , le calcul de la tension de compensation V_C est donné selon la formule suivante :

$$V_C = \left| \tilde{E}_t + (R_C + jX_C) \tilde{I}_t \right| \quad (2.1)$$

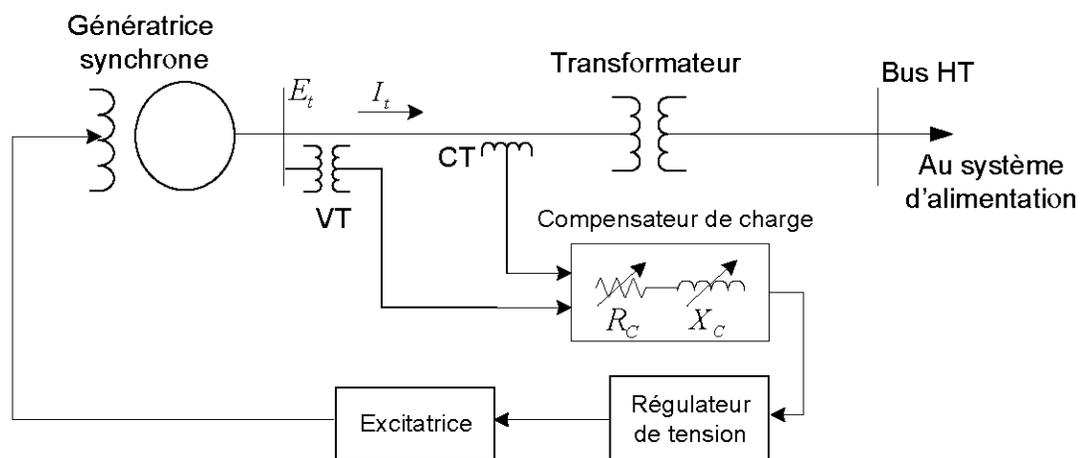


Figure 2-9 Schéma du compensateur de charge [1]

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de savoir plus sur l'importance, le rôle et le fonctionnement d'un système d'excitation dans un groupe turbine-alternateur. Cela nous introduit à une étape importante dans notre travail, qui consiste en la modélisation du système d'excitation du simulateur analogique du groupe turbine-alternateur chez Hydro-Québec, ce qui est sujet dans notre prochain chapitre où le choix du type d'excitation est fait et le modèle mathématique est ensuite élaboré.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DES SOUS-ENSEMBLES DU GROUPE TURBINE- ALTERNATEUR

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, la modélisation de chaque bloc (génératrice, turbine et système d'excitation) du groupe turbine-alternateur est présentée. L'objectif de cette partie est d'illustrer chaque modèle indépendamment, et plus particulièrement présenter le modèle mathématique du système d'excitation du groupe turbine alternateur.

Premièrement, le modèle mathématique de la génératrice synchrone est présenté, dans le repère triphasé abc puis dans le repère de Park [1]. Le modèle de la machine dit hybride le plus approprié dans notre travail de recherche, est développé.

Après la présentation du modèle de la turbine hydraulique, le système d'excitation de type statique ST est modélisé suivant deux méthodes qui seront bien détaillées, selon tout élément qui constitue l'excitation. Cela permettra par la suite, d'effectuer différents essais et tests au niveau du système global après assemblage des trois modèles, pour montrer l'importance de cette partie excitatrice.

3.2 Modélisation de la génératrice synchrone

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

Après l'application de la transformée de Park aux équations de la génératrice, le modèle mathématique est exprimé en unité réduite (pu) par les équations électriques de tension et de flux ainsi que les équations mécaniques [1].

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

3.2.1 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc

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

$$\Psi = L(\theta)i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \psi_s^{abc} \\ \psi_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \psi_s^{abc} &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T ; & \psi_r^{abc} &= [\psi_f \quad \psi_D \quad \psi_Q]^T ; \\ i_s^{abc} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T ; & i_r^{abc} &= [i_f \quad i_D \quad i_Q]^T \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
L_{ss}^{abc}(\theta) &= \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}; L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix} \\
L_{rr}^{abc}(\theta) &= \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Et les équations de tensions sont écrites comme suit :

$$V = RI + \frac{d}{dt}(\Psi) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_s^{abc} \\ \psi_r^{abc} \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

Telles que :

$$\begin{aligned}
v_s^{abc} &= [v_a \quad v_b \quad v_c]^T; \quad v_r^{abc} = [v_f \quad 0 \quad 0]^T \\
R_s &= \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & r_a \end{bmatrix}, \text{ et } R_r = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \right) \tag{3.6}$$

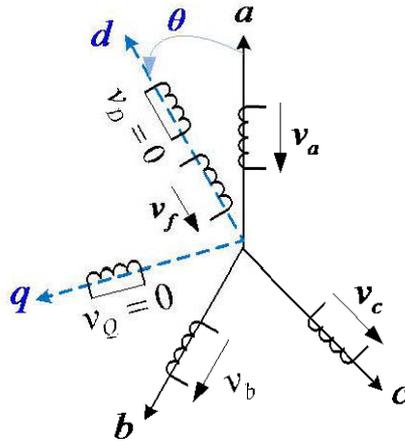


Figure 3-1 Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc).

3.2.2 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park ($dq0$)

La transformation de Park définit une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe (abc) vers le repère mobile ($dq0$), afin de simplifier le modèle du système vu la complexité de l'étude du système.

Les enroulements au niveau du stator (repère abc) sont alors remplacés par deux enroulements ($dq0$) en quadrature.

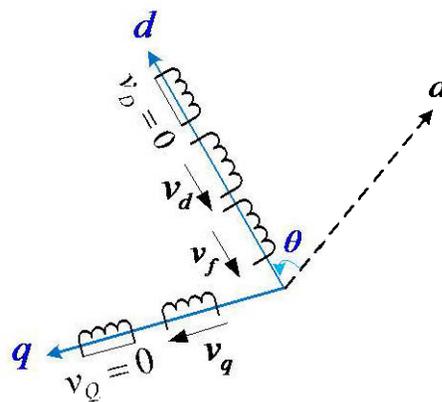


Figure 3-2 Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel $dq0$)

La matrice de passage P est notée comme suit :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

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

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

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

$$\begin{aligned} [I_{dq0}] &= P[I_{abc}] = [i_d \quad i_q \quad i_0]^T \\ [\Psi_{dq0}] &= P[\Psi_{abc}] = [\psi_d \quad \psi_q \quad \psi_0]^T \\ [V_{dq0}] &= P[V_{abc}] = [v_d \quad v_q \quad v_0]^T \end{aligned} \quad (3.9)$$

Et les équations obtenues sont données par :

✓ Équations de flux :

$$\begin{pmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{dq0} & L_{sr}^{dq0} \\ -\frac{3}{2}(L_{sr}^{dq0})^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Telles que :

$$L_{ss}^{dq0} = P(L_{ss}^{abc}(\theta))P^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & L_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{00} \end{bmatrix}; L_{sr} = PL_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af0} & L_{ad0} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq0} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

✓ Équations des tensions :

A partir de la formule des tensions dans le repère abc dans l'équation (3.6). Les tensions au niveau du stator peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} v_s^{dq0} \\ v_r^{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{bmatrix} + \omega_m W \begin{bmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\text{Avec : } \omega_m = \frac{d\theta}{dt}; \quad W = \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

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

✓ Expression des flux en pu :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Avec :

$$X_{ss} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \end{bmatrix}; \quad X_{rr} = \begin{bmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{\mathcal{Q}\mathcal{Q}} \end{bmatrix}; \quad X_{sr} = \begin{bmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{\mathcal{Q}q} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Telles que les réactances mutuelles sont calculées comme suit :

$$\begin{aligned}
 x_d &= x_{md} + x_a ; & x_q &= x_{mq} + x_a ; & x_0 &\approx x_a \\
 x_{ff} &= x_{md} + x_{kf_1} + x_f ; & x_{DD} &= x_{md} + x_D + x_{kf_1} ; & x_{QQ} &= x_{mq} + x_Q ; \\
 x_{df} &= x_{fd} = x_{md} ; & x_{dD} &= x_{Dd} = x_{md} ; & x_{Qq} &= x_{qQ} = x_{mq} ; \\
 x_{fD} &= x_{Df} = x_{DD} - x_D = x_{md} + x_{kf_1}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

✓ Expression des tensions en pu :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$\text{Avec } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \omega_n = \omega_{réf} = 2\pi f_{réf}. \tag{3.18}$$

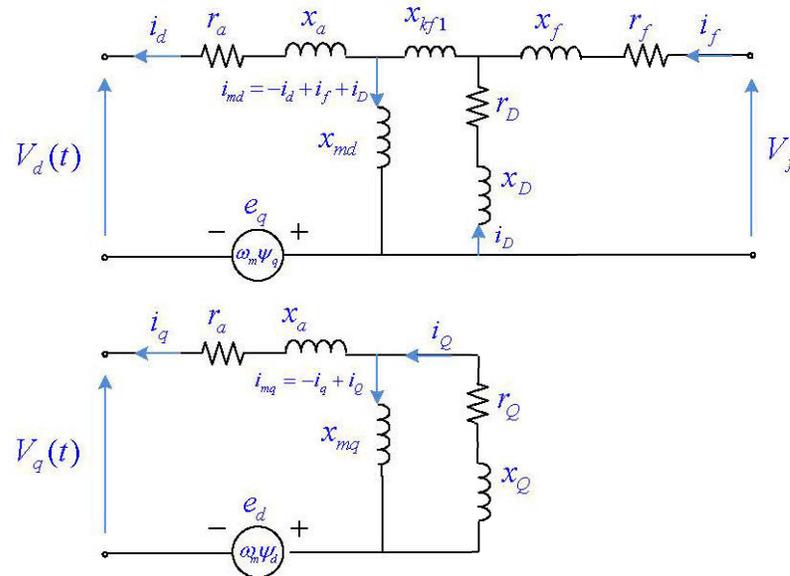


Figure 3-3 Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu)

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

$$2H \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m - T_e - D\omega_m \quad (\text{pu}) \quad (3.19)$$

Le couple électromagnétique en pu est calculé par :

$$T_e = (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.20)$$

3.2.3 Développement du modèle hybride de la génératrice synchrone

Le but principalement visé étant de contrôler, stabiliser et optimiser les valeurs des grandeurs (tension, courant) de sortie au niveau du réseau électrique. Le modèle hybride de la machine synchrone qui est le plus adapté dans ce cas, est alors formulé à partir des équations de tensions et de flux obtenues précédemment.

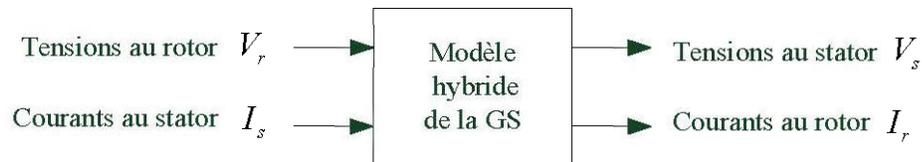


Figure 3-4 Illustration des entrées-sorties du modèle hybride de la génératrice

Les expressions de tension et flux sont résumés dans :

1) Équation de tension :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A partir de l'équation (3.21), on déduit :

$$(3.21) \Rightarrow \begin{cases} V_s = -r_s I_s + \frac{1}{\omega_n} P(\psi_s) + \omega_m J \psi_s \\ V_r = r_r I_r + \frac{1}{\omega_n} P(\psi_r) \end{cases} \quad (3.22)$$

$$(3.23)$$

2) Équation de flux :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$(3.24) \Rightarrow \begin{cases} \psi_s = -X_{ss} I_s + X_{sr} I_r \\ \psi_r = -X_{sr}^T I_s + X_{rr} I_r \end{cases} \quad (3.25)$$

$$(3.26)$$

À partir de l'équation (3.23) on aura :

$$\frac{1}{\omega_n} P(\psi_r) = -r_r I_r + V_r \quad (3.27)$$

De l'équation (3.26), on obtient :

$$I_r = X_{rr}^{-1} (\psi_r + X_{sr}^T I_s) \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow I_r = X_{rr}^{-1} \psi_r + X_{rr}^{-1} X_{sr}^T I_s \quad (3.29)$$

En remplaçant (3.29) dans (3.27), on aboutit à :

$$\frac{1}{\omega_n} P(\psi_r) = -r_r X_{rr}^{-1} \psi_r - r X_{rr}^{-1} X_{sr}^T I_s + V_r \quad (3.30)$$

$$\Rightarrow P(\psi_r) = \underbrace{-\omega_n r_r X_{rr}^{-1}}_A \psi_r - \underbrace{\omega_n r X_{rr}^{-1} X_{sr}^T}_{B_1} I_s + \underbrace{\omega_n}_{B_2} V_r \quad (3.31)$$

En prenant le flux comme variable d'état.

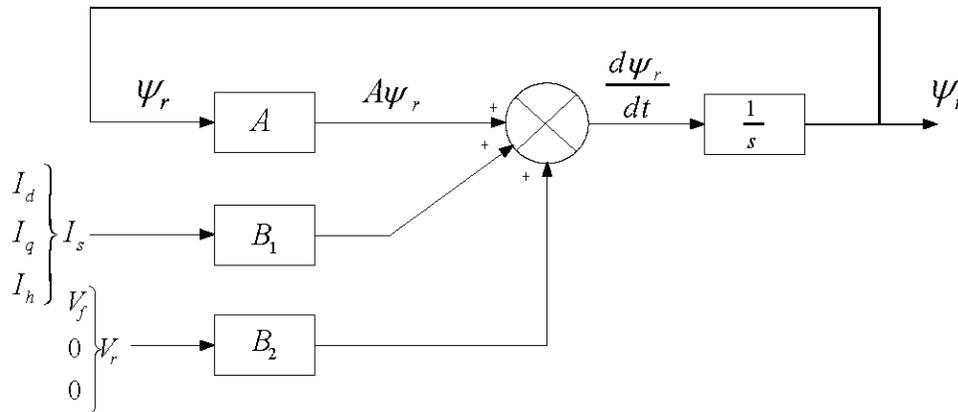


Figure 3-5 Schéma fonctionnel des états (flux)

➤ **Calcul des sorties :**

À partir de l'équation (3.22)

$$V_s = -r_s I_s + \frac{1}{\omega_n} P(\psi_s) + \omega_m J \psi_s, \text{ en négligeant les deux termes } r_s I_s \text{ et } \frac{1}{\omega_n} P(\psi_s)$$

On aura $V_s \approx \omega_m J \psi_s$

$$\text{Sachant que } \psi_s = -X_{ss}I_s + X_{sr}I_r \quad (3.32)$$

En remplaçant (3.29) dans (3.32), on obtient :

$$\psi_s = -X_{ss}I_s + X_{sr}X_{rr}^{-1}\psi_r + X_{sr}X_{rr}^{-1}X_{sr}^T I_s \quad (3.33)$$

$$\Rightarrow \psi_s = \underbrace{X_{sr}X_{rr}^{-1}}_C \psi_r + \underbrace{(X_{sr}X_{rr}^{-1}X_{sr}^T - X_{ss})}_D I_s \quad (3.34)$$

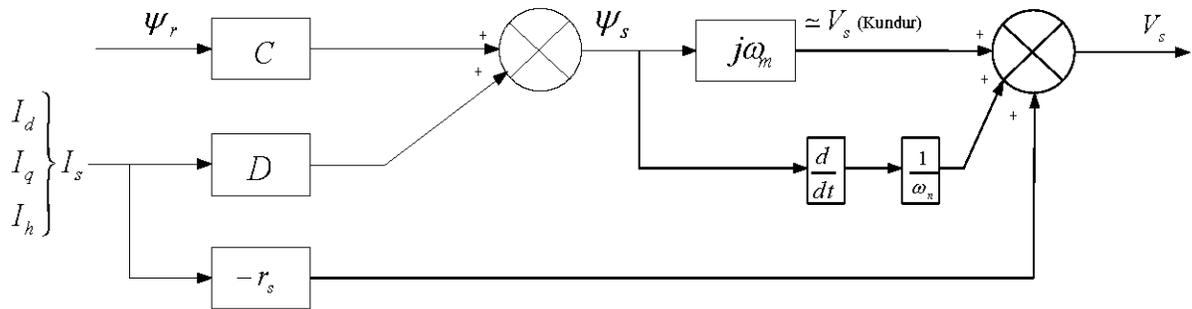


Figure 3-6 Schéma fonctionnel des sorties (ψ_s, V_s)

3.3 Modèle de la turbine hydraulique et servomoteur

Dans une turbine hydraulique, les vannes sont actionnées par un servomoteur. L'eau pénètre dans une conduite forcée pour augmenter sa vitesse. À la sortie de la conduite, elle fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'eau est ensuite évacuée par une galerie de fuite.

La modélisation de tous les composants de la turbine hydraulique aboutit à un modèle non linéaire décrit par les équations de la dynamique du débit et la puissance mécanique [5] :

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} \left(1 - \frac{q^2}{A_t^2 g^2} \right) \\ P_m = \frac{q^3}{A_t^2 g^2} \end{cases} \quad (3.35)$$

Le modèle linéaire est obtenu par la linéarisation autour d'un point de fonctionnement (g_0, q_0, P_0) [18] (annexe 2), on aura alors les équations suivantes.

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \\ P_m = \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^3}{A_t^2 g_0^3} (g - g_0) + P_0 \end{cases} \quad (3.36)$$

En utilisant les équations suivantes au point de fonctionnement :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2} \\ q_0 = A_t g_0 = G_0 \end{cases} \quad (3.37)$$

On obtient facilement le modèle linéaire de la turbine hydraulique avec le servomoteur comme suite :

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2}{T_w G_0} q + \frac{2A_t}{T_w G_0} g \\ \frac{dg}{dt} = -K_a g + K_a u \\ P_m = 3q - 2A_t g \end{cases} \quad (3.38)$$

Où $q, g, P_m, A_t, T_w, T_a, K_a$, et u représentent respectivement le débit d'eau dans la turbine, le vannage, la puissance mécanique, gain de la turbine, le temps d'établissement du débit nominal, la constante de temps du servomoteur, le gain et la commande du servomoteur [5].

3.4 Modélisation du système d'excitation statique

Dans notre travail, nous avons opté pour un système d'excitation de type statique à source de tension avec redresseur commandé présenté dans le chapitre 2 (Figure 2-6). Celui-ci correspond parfaitement aux attentes du simulateur analogique d'Hydro-Québec.

Dans cette partie, nous développons le modèle mathématique utilisé de l'excitatrice statique suivant deux méthodes : le modèle par méthode DQ et le modèle type ST de IEEE.

3.4.1 Modèle par la méthode DQ

Cette méthode consiste en la représentation du redresseur commandé de l'excitatrice statique (Figure 2-6), par le circuit électrique dans le cas d'une alimentation triphasée de la Figure 3-7 [19] [20].

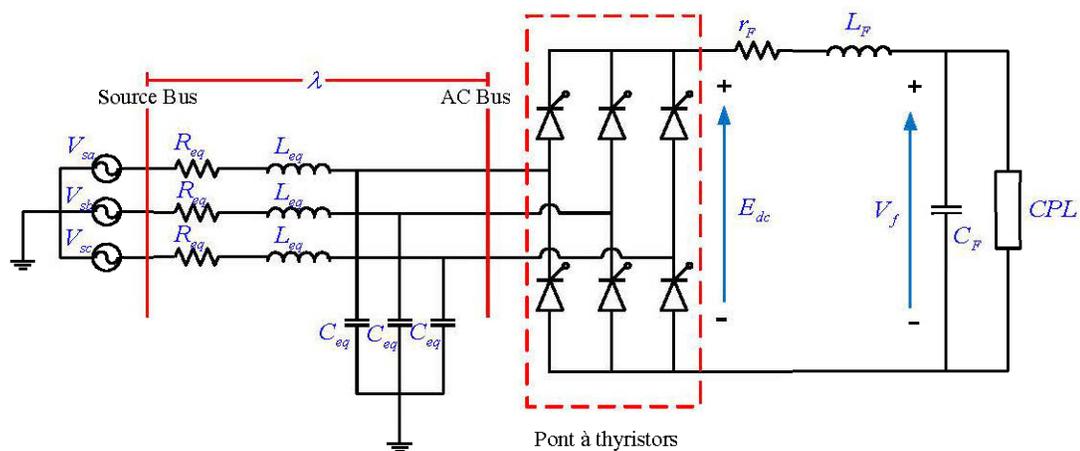


Figure 3-7 Schéma du convertisseur commandé lié au réseau

Le redresseur est représentée par un pont à thyristor, la ligne de transmission est définie par les impédances équivalentes (R_{eq} , L_{eq} et C_{eq}), et le filtre par (r_F , L_F et C_F). La sortie du filtre est souvent reliée a une charge idéale CPL afin d'évaluer les grandeurs de sortie du redresseurs commandé.

Tel que le courant de sortie est donné par la formule suivante :

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_f} \quad (3.39)$$

Se basant sur le circuit équivalent dans la Figure 3-9, l'effet des inductances équivalentes (L_{eq}) en alternatif entraine une chute de tension après redressement, qui définie par est résistance variable $r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi}$; où ω est la fréquence de source.

La modélisation du redresseur commandé dans le repère dq est simplement développée sous forme d'un transformateur (Figure 3-8) en utilisant les équations de transformation qui vont suivre.

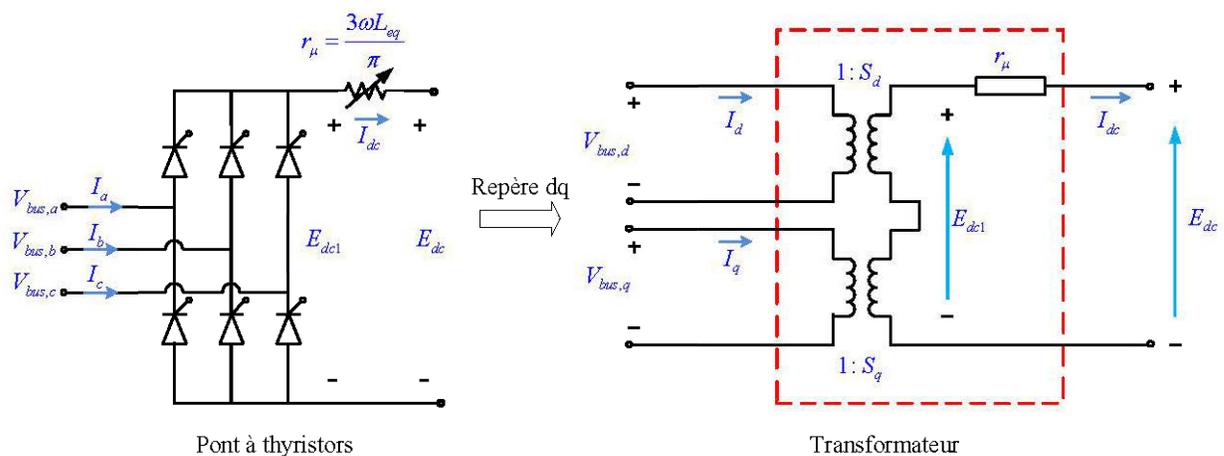


Figure 3-8 Circuit équivalent du redresseur commandé dans le repère dq

✓ **Modèle mathématique dans le repère abc :**

$$\begin{cases} I_{abc} = S_{abc} \cdot I_{dc} \\ E_{dc1} = S_{abc}^T \cdot V_{bus,abc} \end{cases} \quad (3.40)$$

Telle que :

$$S_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \alpha) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \end{bmatrix}^T \quad (3.41)$$

Où ϕ : Angle de phase des tensions de bus et α : Angle d'amorçage des thyristors.

S_{abc} : Matrice de passage dans le repère abc.

✓ **Modèle mathématique dans le repère dq :**

Le passage du modèle mathématique du redresseur commandé dans le repère abc s'effectue par la matrice de transformation $T[\theta(t)]$ définie par la formule suivante :

$$T[\theta(t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \cos\left(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta(t)) & -\sin\left(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\text{Où } \theta(t) = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1 \quad (3.43)$$

Tel que ω représente la fréquence du signal de source.

Et ϕ_1 : Angle de phase des tensions dans le repère dq.

En combinant ainsi, les équations (3.40) - (3.42), on obtient :

$$\begin{cases} I_{dq} = S_{dq} I_{dc} \\ E_{dc1} = S_{dq}^T V_{bus,dq} \end{cases} \quad (3.44)$$

La matrice de passage S_{dq} dans le repère dq, est donnée par :

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [\cos(\phi_1 - \phi + \alpha) \quad -\sin(\phi_1 - \phi + \alpha)]^T \quad (3.45)$$

Finalement, en utilisant le modèle par la méthode DQ, se basant sur la matrice de transformation $T[\theta(t)]$ définie en (3.42) et le circuit équivalent du redresseur de la Figure 3-8, nous pouvons représenter le redresseur commandé lié au réseau de la Figure 3-7 par le circuit équivalent suivant dans la Figure 3-9.

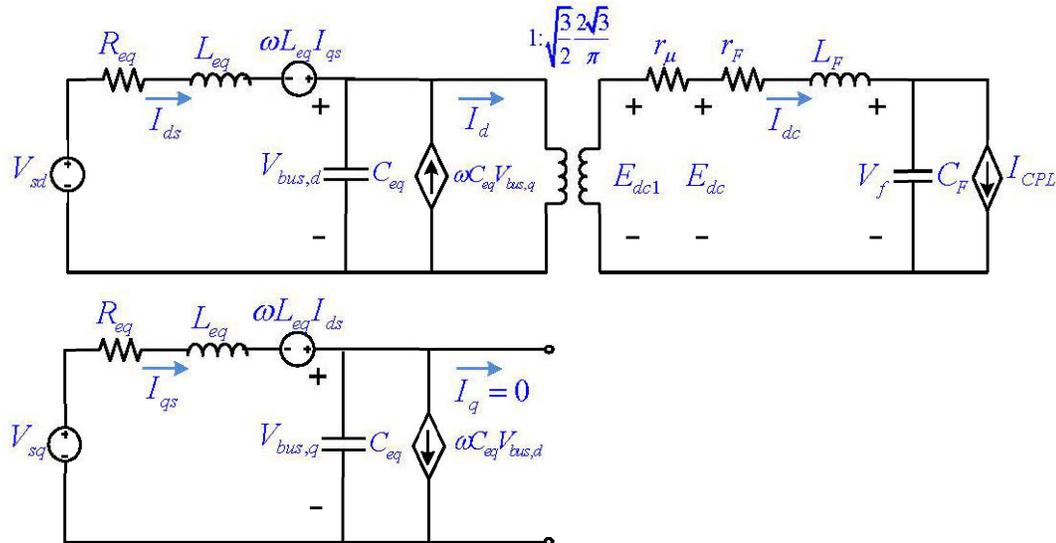


Figure 3-9 Circuit électrique équivalent du redresseur commandé lié au réseau dans le repère dq [19]

✓ **Modèle d'état final du convertisseur commandé :**

A travers le circuit électrique équivalent du redresseur commandé Figure 3-9, et après l'application de la loi de kirchhoff pour les grandeurs électriques de tension et de courant, nous aboutissons aux équations suivantes [19] [20] :

$$\left\{ \begin{array}{l} p(I_{ds}) = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ p(I_{qs}) = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ p(V_{bus,d}) = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} - \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ p(V_{bus,q}) = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ p(I_{dc}) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F + r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_f \\ p(V_f) = \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_f} \end{array} \right. \quad (3.46)$$

Tel que :

$$\text{Variables d'états : } X = \left[I_{ds} \quad I_{qs} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_f \right]^T$$

$$\text{La variable de commande d'états : } U = \left[V_m \quad P_{CPL} \right]^T$$

$$\text{La variable de sortie : } Y = V_f$$

Le système d'équation (3.45) est non linéaire, la linéarisation se fait alors par le terme du premier ordre des séries de Taylor autour d'un point d'équilibre (X_0, U_0) [18] (annexe 2).

Le système d'état après la linéarisation sera alors défini par :

$$\begin{cases} \delta X = A(X_0, U_0) \delta X + B(X_0, U_0) \delta U \\ \delta Y = C(X_0, U_0) \delta X + D(X_0, U_0) \delta U \end{cases}$$

Où l'état, la commande et la sortie sont respectivement :

$$\begin{cases} \delta X = [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_f]^T \\ \delta U = [\delta V_m \quad \delta P_{CPL}]^T \\ \delta Y = \delta V_f \end{cases}$$

Les matrices A , B , C et D sont données comme suit :

$$A(X_0, U_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ \omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{P_{CPL}}{C_F V_{f0}^2} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (3.47)$$

$$B(X_0, U_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3} \cos(\lambda_0 + \alpha_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ \frac{\sqrt{3} \sin(\lambda_0 + \alpha_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_F V_{f0}} \end{bmatrix}_{6 \times 2} ; \quad \begin{aligned} C(X_0, U_0) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]_{1 \times 6} \\ D(X_0, U_0) &= [0 \quad 0]_{1 \times 2} \end{aligned}$$

✓ **Modèle d'état du convertisseur commandé avec régulation de l'excitation**
[20] [21]

Afin de réguler la tension d'excitation V_f , des régulateurs classiques PI peuvent être utilisés. Le circuit électrique du convertisseur statique de la Figure 3-7 avec régulation devient comme montré à la Figure 3-10 [20].

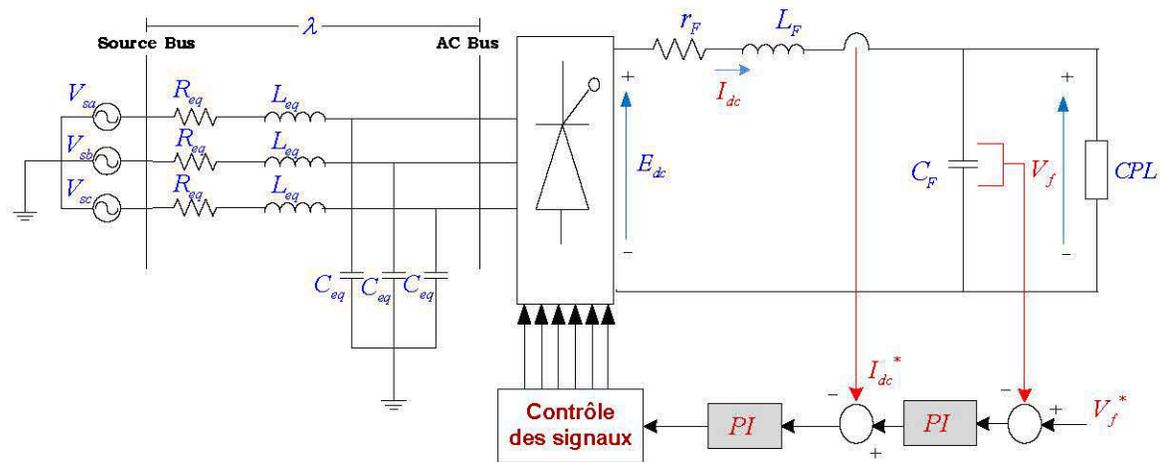


Figure 3-10 Convertisseur avec régulateurs

Le schéma fonctionnel du régulateur PI est donné par :

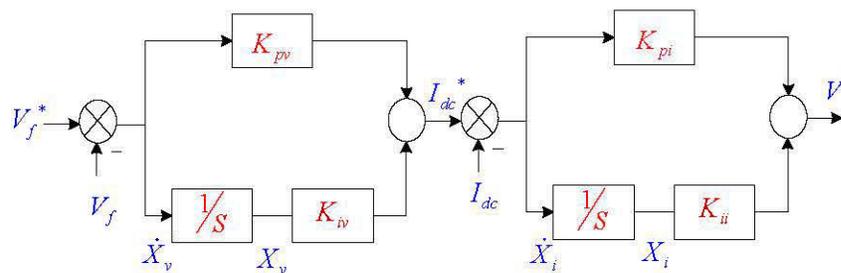


Figure 3-11 Régulation par PI

A partir du schéma de régulation PI (Figure 3-11), on déduit les équations suivantes

$$\begin{cases} V^* = -K_{pi} I_{dc} - K_{pv} K_{pi} V_f + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_f^* \\ p(X_v) = -V_f + V_f^* \\ p(X_i) = -I_{dc} - K_{pv} V_f + K_{iv} X_v + K_{pv} V_f^* \end{cases} \quad (3.48)$$

Le circuit électrique équivalent du convertisseur statique avec régulation de la tension d'excitation, dans le repère dq est alors le suivant :

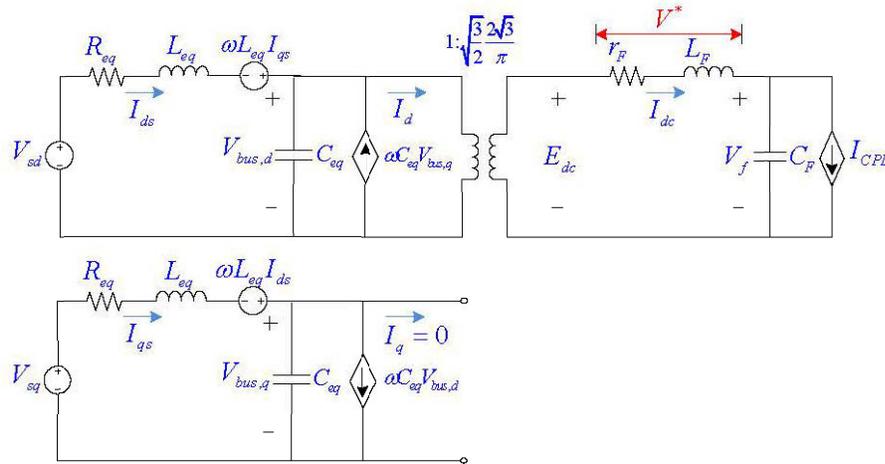


Figure 3-12 Circuit électrique équivalent du convertisseur régulé [20]

A partir du circuit équivalent, on peut écrire :

$$V^* = r_F I_{dc} + L_F \cdot p(I_{dc}) \quad (3.49)$$

En remplaçant V^* (3.49) dans l'équation (3.48), on obtient

$$p(I_{dc}) = -\left(\frac{r_F + K_{pi}}{L_F}\right)I_{dc} + \left(\frac{K_{iv}K_{pi}}{L_F}\right)X_v + \frac{K_{ii}}{L_F}X_i - \left(\frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F}\right)V_f + \left(\frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F}\right)V_f^* \quad (3.50)$$

En intégrant les équations additionnelles (3.48) et (3.50) obtenues après régulations, Les équations alors en (3.45), deviennent [20] :

$$\left\{ \begin{array}{l} p(I_{ds}) = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sd} \\ p(I_{qs}) = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sq} \\ p(V_{bus,d}) = \frac{1}{C_{eq}}I_{ds} - \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}}I_{dc} \\ p(V_{bus,q}) = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}}I_{qs} \\ p(I_{dc}) = -\left(\frac{r_F + K_{pi}}{L_F}\right)I_{dc} + \left(\frac{K_{iv}K_{pi}}{L_F}\right)X_v + \frac{K_{ii}}{L_F}X_i - \left(\frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F}\right)V_f + \left(\frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F}\right)V_f^* \\ p(V_f) = \frac{1}{C_F}I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_f} \\ p(X_v) = -V_f + V_f^* \\ p(X_i) = -I_{dc} - K_{pv}V_f + K_{iv}X_v + K_{pv}V_f^* \end{array} \right. \quad (3.51)$$

Le système d'équation dans (3.51) est non linéaire. Après linéarisation autour d'un point d'équilibre (annexe 2). Le système d'état sera défini comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta X = A_{reg}(X_0, U_0)\delta X + B_{reg}(X_0, U_0)\delta U \\ \delta Y = C_{reg}(X_0, U_0)\delta X + D_{reg}(X_0, U_0)\delta U \end{array} \right.$$

Où l'état, la commande et la sortie sont écrits comme suit :

$$\begin{cases} \delta X = [\delta I_{ds} & \delta I_{qs} & \delta V_{bus,d} & \delta V_{bus,q} & \delta I_{dc} & \delta V_f & \delta X_v & \delta X_i]^T \\ \delta U = [\delta V_m & \delta V_f^* & \delta P_{CPL}]^T \\ \delta Y = \delta V_f \end{cases}$$

Et les matrices A_{reg} , B_{reg} , C_{reg} et D_{reg} sont données par :

$$A_{reg}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(r_F + K_{pi})}{L_F} & -\frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F} & \frac{K_{iv}K_{pi}}{L_F} & \frac{K_{ii}}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL0}}{V_{f0}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 8} \quad (3.52)$$

$$B_{reg}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\cos(\lambda_0 + \alpha_0)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin(\lambda_0 + \alpha_0)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{pv}K_{pi}}{L_F} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_F V_{f0}} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv} & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 3}$$

$$C_{reg}(x_0, u_0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]_{1 \times 8}$$

$$D_{reg}(x_0, u_0) = [0 \ 0 \ 0]_{1 \times 3}$$

✓ **Exemple de simulation du modèle par méthode DQ :**

Afin d'illustrer la dynamique du convertisseur commandé se basant sur le modèle obtenu par la méthode DQ, nous allons présenter quelques tests de simulations obtenus dans matlab (l'exemple d'application numérique et le scripte associé sont donnés en annexe 3 et 5 respectivement).

Pour une tension d'entrée $V_s = 230 V_{rms/phase}$, et une fréquence $f = 60 Hz$.

1) Redresseur lié au réseau, sans régulation de la tension d'excitation V_f (Figure 3-9)

- Pour une variation de charge à la sortie P_{cpl} de 2 kW à 4 kW, opérée à $t = 0.5 s$, avec un angle d'amorçage des thyristors $\alpha = 10$ degrés :

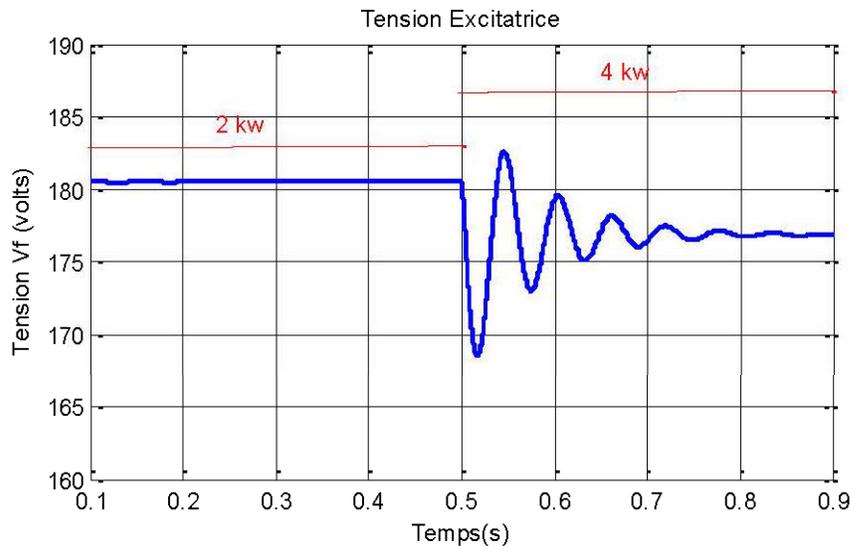


Figure 3-13 Tension de sortie $V_f (\alpha = 10^\circ)$

- Pour une variation de charge à la sortie P_{cpl} de 2 kW à 4 kW, opérée à $t = 0.5$ s, avec un angle d'amorçage des thyristors $\alpha = 15$ degrés :

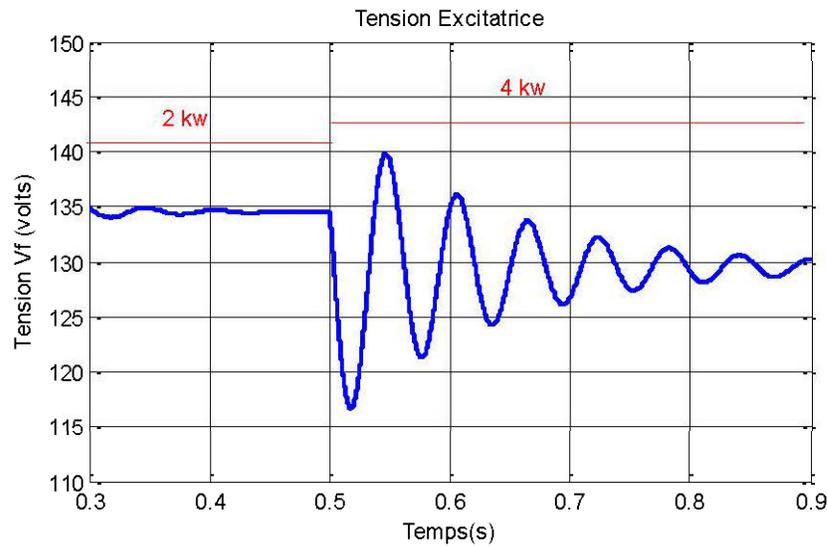


Figure 3-14 Tension de sortie $V_f(\alpha = 15^0)$

Remarque :

- Selon les Figures 3-13 et 3-14, plus la charge P_{cpl} augmente, plus la tension de sortie V_f diminue.
- Plus l'angle d'amorçage est grand plus la tension de sortie V_f diminue, et le système devient de plus en plus lent et instable (Figure 3-14).
- Les résultats obtenus exigent forcément un contrôle de la sortie pour remédier à l'instabilité du système.

2) Redresseur lié au réseau, avec régulation de la tension d'excitation V_f

Après la synthèse des correcteurs PI (Figure 3-11) comme suit, à partir des schémas en Figure 3-15 et Figure 3-16 [20] :

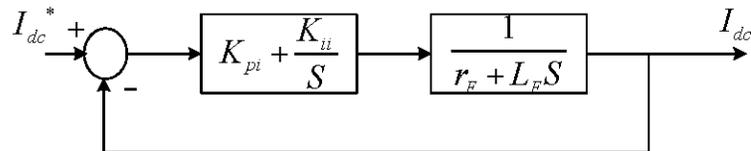


Figure 3-15 Calcul des paramètres K_{pi} et K_{ii}

Le système étant du 2^{ème} ordre sous la forme $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$

Tel que ξ et ω_n représentent le coefficient d'amortissement réduit et la pulsation propre du système respectivement. On déduit alors les paramètres du PI :

$$\frac{I_{dc}}{I_{dc}^*} = \frac{sK_{pi} + K_{ii}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} + r_F}{L_F}\right)s + \frac{K_{ii}}{L_F}} \Rightarrow \begin{cases} K_{pi} = 2\xi\omega_n L_F - r_F \\ K_{ii} = \omega_n^2 L_F \end{cases} \quad (3.53)$$

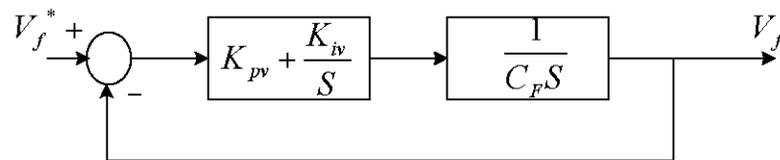


Figure 3-16 Calcul des paramètres K_{pv} et K_{iv}

$$\frac{V_f}{V_f^*} = \frac{sK_{pv} + K_{iv}}{s^2 + \frac{K_{pv}}{C_F} \cdot s + \frac{K_{iv}}{C_F}} \Rightarrow \begin{cases} K_{pv} = 2\xi\omega_{nv}C_F \\ K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_F \end{cases} \quad (3.54)$$

- Pour une variation de charge à la sortie Pcp1 de 3 kW à 4 kW, opérée à $t = 0.3s$, avec un angle d'amorçage des thyristors $\alpha = 10$ degrés, avec une consigne de tension $V_f^* = 300$ volts.

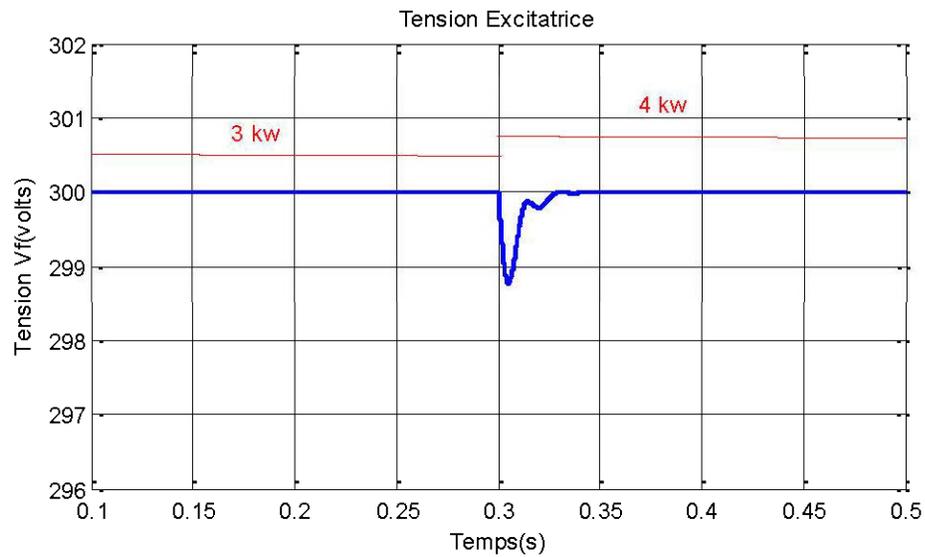


Figure 3-17 Tension de sortie V_f régulée

D'après la Figure 3-17, le Régulateur PI maintient la tension d'excitation V_f à la valeur désirée $V_f^* = 300$ Volts, même avec une variation de la charge extérieure Pcp1.

✓ Remarques

La modélisation du système d'excitation par la méthode DQ présente des résultats satisfaisants. Cette méthode permet la régulation de la tension de sortie du convertisseur classique [20] [21], cela dit, la complexité des calculs et des équations du système d'état qui représentent le convertisseur statique ainsi que l'intervention de plusieurs paramètres, implique souvent, un temps de simulation assez important. Ce type de modèle incluant le convertisseur statique est souvent utilisé dans l'amélioration de la stabilité due à une charge CPL [21]. Il introduit une étude intéressante dans les systèmes plus complexe de production, tels que les génératrices synchrones.

3.4.2 Modèle IEEE type ST

Les modèles mathématiques des systèmes d'excitation sont essentiels pour l'évaluation des performances exigées, pour l'optimisation et la conception ainsi que la coordination de commande supplémentaire et de circuits de protection [1] [12], et aussi important pour les études de stabilité de systèmes liées à la planification et à l'exploitation des systèmes d'énergie électriques [6] [9] [11]. Le détail du modèle requis dépend souvent du but de l'étude à faire [22]. Dans notre travail, le contrôle et les dispositifs de sécurité qui ont un impacte sur l'étude de la stabilité transitoire et les petits signaux sont principalement définis par le régulateur de tension, le stabilisateur de puissance et la commande et stabilisation de l'excitation [1] [9].

Dans cette partie, la modélisation du système d'excitation statique de type ST1 standardisé par IEEE est présentée [1] [23]; le modèle de chaque élément est illustré indépendamment puis assemblé pour présenter le modèle globale de l'excitatrice.

➤ **Modèle de chaque élément du système d'excitation type ST [1]**

✓ **Modèle de l'amplificateur :**

Le pont à thyristor de l'excitatrice statique est souvent modélisé par un amplificateur tout en prenant compte des circuits de stabilisations et de limitations qui en découlent. L'amplificateur peut être de type magnétique ou électronique, il est caractérisé par un système de premier ordre incluant un gain K_A et une constante de temps T_A (Figure 3-18).

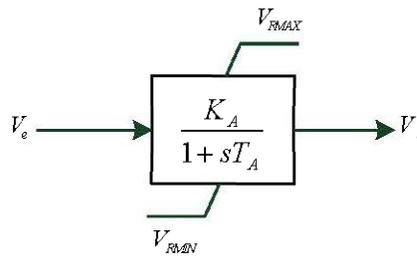


Figure 3-18 Modèle de l'amplificateur

La tension de sortie de l'amplificateur est limitée par une saturation, spécifiée par les bornes V_{RMAX} et V_{RMIN} dites les limites de saturation.

La limitation de tension de sortie de l'amplificateur varie souvent en fonction de la tension externe de la génératrice (saturation dynamique).

✓ **Modèle du circuit de stabilisation :**

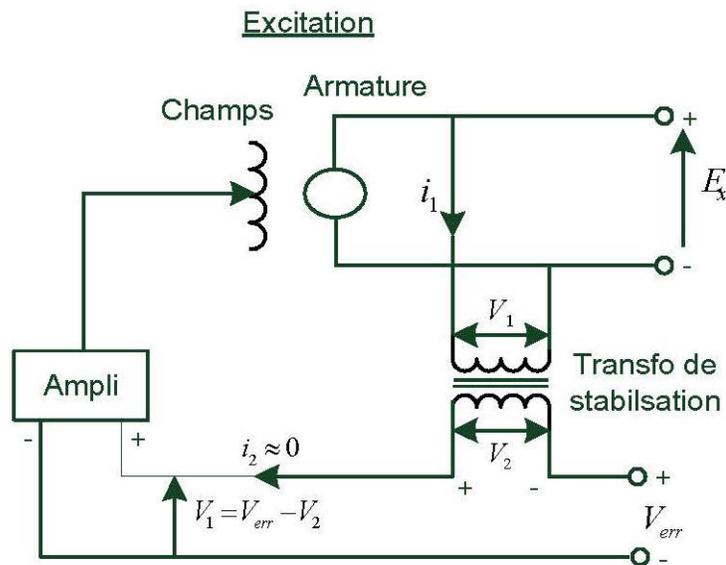


Figure 3-19 Système d'excitation et transformateur de stabilisation [1]

Dans ce type de système d'excitation, les transformateurs série sont les plus utilisés tel que montré dans la Figure 3-19 ci-dessus. Les équations liées au transformateur de stabilisation sont données dans le domaine de Laplace comme suit :

$$\begin{cases} V_1 = R_1 i_1 + sL_1 i_1 + sM i_2 \\ V_2 = R_2 i_2 + sL_2 i_2 + sM i_1 \end{cases} \quad (3.55)$$

Où les indices 1 et 2 désignent le primaire et le secondaire du transformateur, et R , L et M représente la résistance, l'induction de fuite et l'induction mutuelle, respectivement. Étant donné que le secondaire du transformateur est connecté à un circuit à haute impédance, alors i_2 est négligé, on aura donc :

$$\begin{cases} V_1 = (R_1 + sL_1) i_1 \\ V_2 = sM i_1 \end{cases} \quad (3.56)$$

Alors :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{sM_1}{R_1 + sL_1} = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \quad (3.57)$$

Où $K_F = M/R_1$ et $T_F = L_1/R_1$

✓ **Les limitations :**

Dans la modélisation des systèmes d'excitation de type ST, les circuits limiteurs jouent un rôle important, cependant il est nécessaire de distinguer entre deux sortes de limitation, la limitation après bloc (*windup*), et la limitation en bloc (*non-windup*), pour ce faire nous illustrons un exemple d'une fonction d'intégration de l'entrée dans chacun des deux cas, présentée dans la Figure 3-20 ci-dessous :

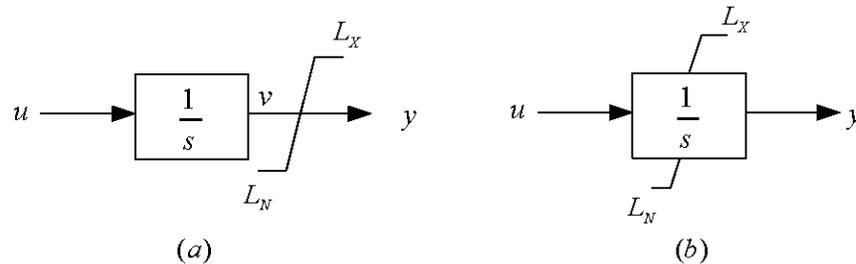


Figure 3-20 Fonctionnement des limitations

A partir de la Figure 3-20, on a :

$$(a) \Rightarrow \frac{dv}{dt} = u \quad (3.58)$$

La sortie y est calculée selon les cas suivants :

$$\text{Si } L_N < v < L_X \Rightarrow y = v \quad (3.59)$$

$$\text{Si } v \geq L_X \Rightarrow y = L_X \quad (3.60)$$

$$\text{Si } v \leq L_N \Rightarrow y = L_N \quad (3.61)$$

$$(b) \Rightarrow \frac{dy}{dt} = u \quad (3.62)$$

La sortie y est calculée comme suit :

$$\text{Si } L_N < y < L_X \Rightarrow \frac{dy}{dt} = u \quad (3.63)$$

$$\text{Si } y \geq L_X \text{ et } \frac{dy}{dt} > 0 \Rightarrow \frac{dy}{dt} = 0 \text{ et } y = L_X \quad (3.64)$$

$$\text{Si } y \leq L_N \text{ et } \frac{dy}{dt} < 0 \Rightarrow \frac{dy}{dt} = 0 \text{ et } y = L_N \quad (3.65)$$

Pour les limitations après bloc (externe), la variable v n'est pas limitée, par conséquence la variable de sortie y suit la valeur de v , jusqu'à ce que v atteigne les bornes L_X et L_N . Alors que pour les limitations en bloc (interne), la variable de sortie y est limitée et prend la valeur des bornes dès que u change de signe.

✓ Les fonctions de déclenchement «Gate» :

Des circuits de déclenchement sont souvent utilisés pour contrôler un ou deux signaux d'entrée. La Figure 3-21 illustre les fonctions de basse valeur (Low Value, LV gate) et de grande valeur (High Value, HV gate) :

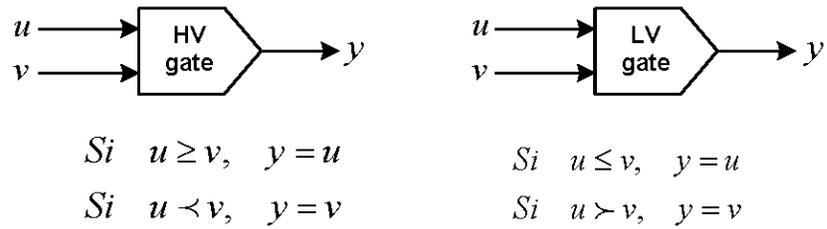


Figure 3-21 Fonctions de déclenchement (Gate)

❖ **Modèle globale du système d'excitation statique :**

La Figure 3-22 ci-dessous représente la structure générale d'un modèle détaillé de système d'excitation ayant une correspondance pour chaque équipement physique. Pour simplifier les études sur ce modèle, plusieurs techniques sont adaptées dépendamment de l'étude souhaitée.

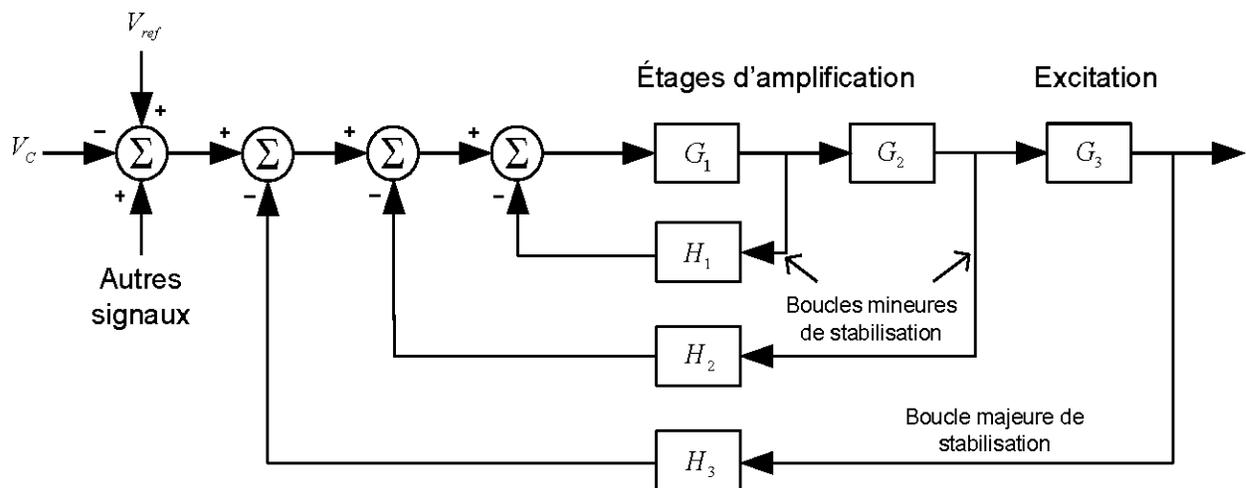


Figure 3-22 Structure du modèle détaillé du système d'excitation

✓ **Modèle du système d'excitation statique type ST1A**

Le modèle du système d'excitation statique de type ST1A est défini par un redresseur commandé à source de tension tel que présenté en chapitre 2 (Figure 2-26).

Le courant d'excitation du redresseur commandé est fourni par la génératrice synchrone à travers le transformateur de puissance, les valeurs de la tension d'excitation alors sont proportionnelles à celles de la tension de sortie de la génératrice, la constante K_C est définie au niveau des limitations de V_{FD} (saturation dynamique). La limitation du courant d'excitation est aussi prise en compte par l'introduction de la constante I_{LR} et le gain K_{LR} . La Figure 3-23 ci-dessous présente ce type de système d'excitation en toutes ses parties principales [1] [23] [24] [25].

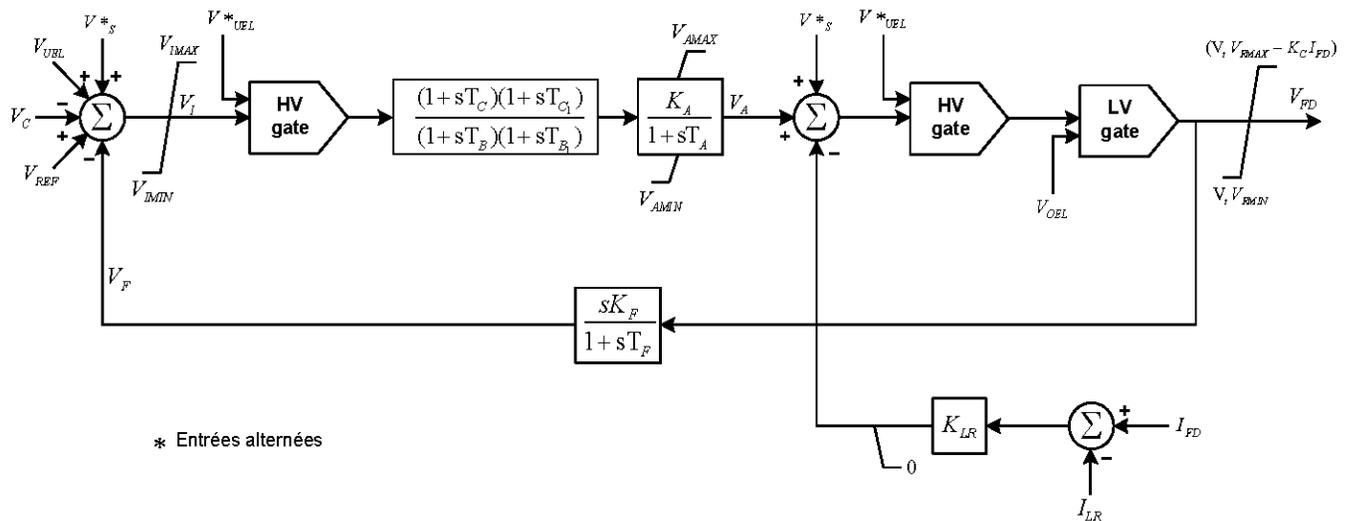


Figure 3-23 Modèle IEEE du système d'excitation statique type ST1A

3.5 Conclusion

Cette section du document, nous a présenté toute la partie modélisation mathématique, et mise en équation de chaque élément constitutif d'un groupe turbine-alternateur; génératrice synchrone, turbine hydraulique et système d'excitation. Cependant, l'élément essentiel dans notre travail, défini par l'excitatrice, comporte des parties de commande, régulation et stabilisation, le chapitre suivant va présenter ces différentes parties.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉGULATEURS CONVENTIONNELS D'UN GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR

4.1 Introduction

Ce chapitre traite les différents équipements qui interviennent principalement au niveau du système d'excitation d'un groupe turbine-alternateur. Ces éléments dits régulateurs conventionnels sont utilisés afin d'assurer le bon fonctionnement du groupe. On distingue le régulateur automatique de tension AVR qui permet de contrôler la tension d'excitation, le régulateur classique PID de la tension terminale génératrice, le régulateur de vitesse (speed governor) qui lui contrôle la vitesse de rotation et enfin le stabilisateur de puissance (PSS) qui intervient en principe dans l'amortissement des oscillations de puissance au niveau du réseau.

4.2 Régulateur automatique de tension

La sortie de l'AVR dépend uniquement de la tension terminale. Il agit sur l'excitatrice du générateur afin de maintenir la tension terminale constante [1] [25]. La Figure 4-1 représente le schéma de principe de la régulation de tension dans une génératrice.

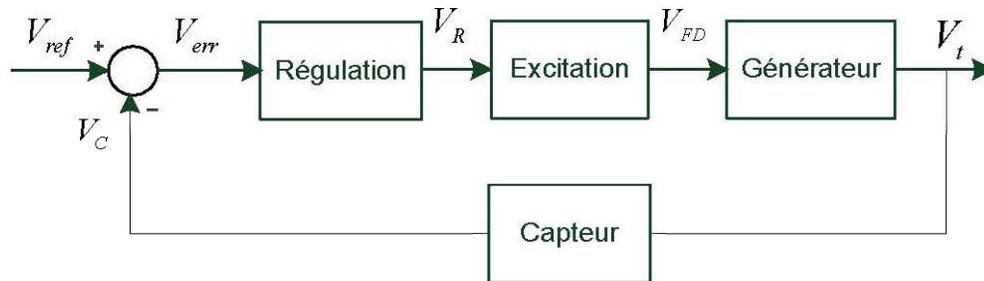


Figure 4-1 Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine-alternateur [1] [25] [26]

4.2.1 Régulation et stabilisation de la tension d'excitation

Le régulateur de tension automatique AVR et l'excitatrice constituent principalement le système d'excitation du générateur [1] [26]. Comme vu dans le chapitre 2, il existe plusieurs types de systèmes d'excitation. Le régulateur de tension a pour entrée la tension de référence qui constitue la consigne, la tension terminale provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation provenant du stabilisateur de puissance et enfin un retour après amortissement (compensation). La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un compensateur de phase puis par le régulateur principal. Ci-dessous est représenté le système d'excitation statique de type ST1 standardisé par IEEE.

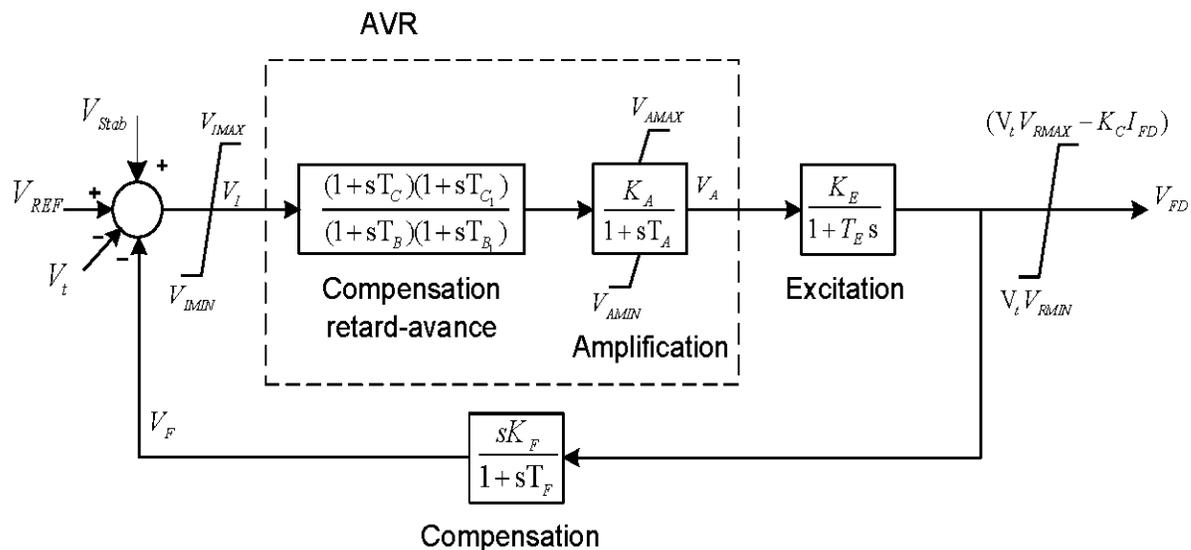


Figure 4-2 Système d'excitation type ST1 de IEEE

Afin de contrôler la tension d'excitation V_{FD} , le système simplifié (T_C , T_{C1} , T_B , et T_{B1} sont négligés) peut être représenté comme suit [1] [2] :

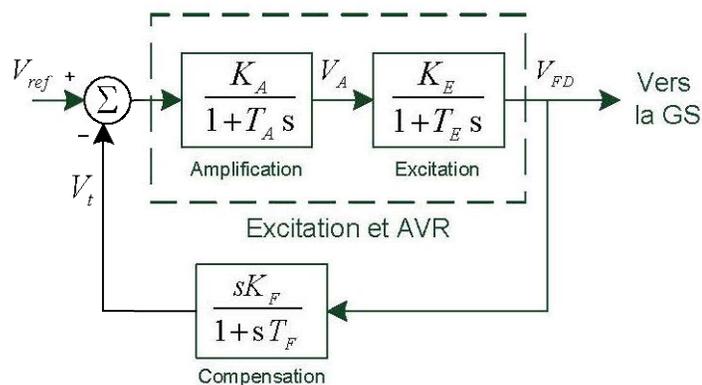


Figure 4-3 Régulation et stabilisation de la tension d'excitation

4.2.2 Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone :

Afin de corriger la tension de sortie de la génératrice V_S , un régulateur de type PID classique est le plus souvent intégré au système vu son efficacité de donner des réponses plus performantes tellement il associe les trois actions principales (proportionnelle, intégrale et dérivée) [25] [26].

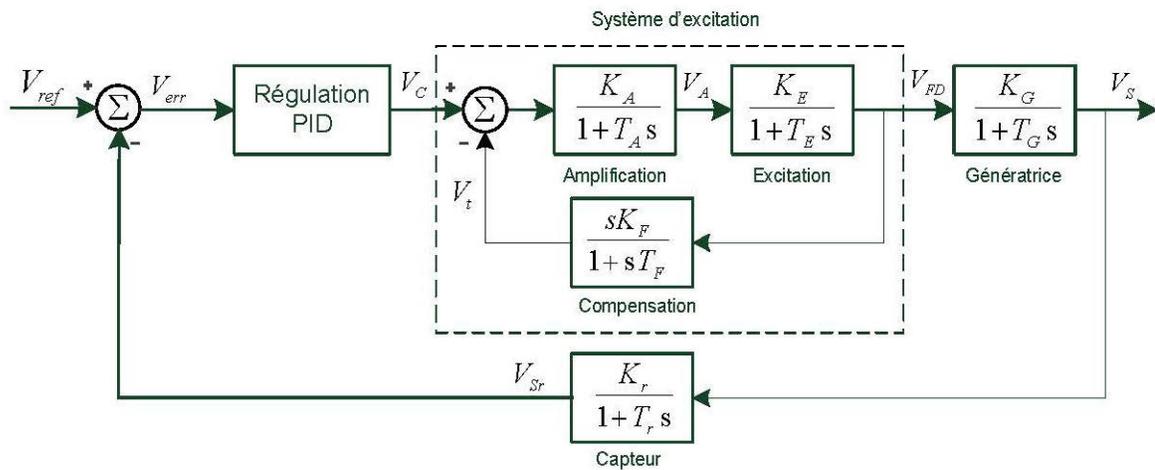


Figure 4- 4 Régulation de la tension de sortie de la génératrice

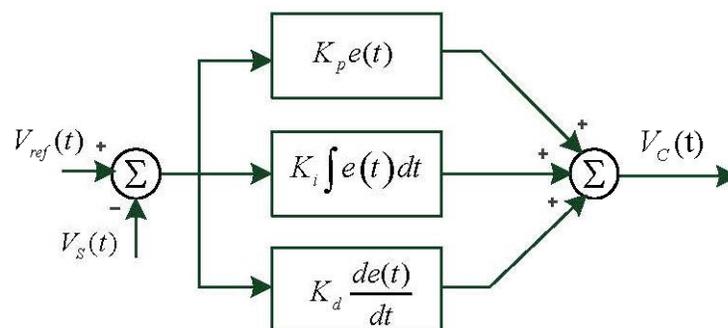


Figure 4-5 Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique

La tension de sortie corrigée est donnée par :

$$V_c(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

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

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

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (4.2)$$

✓ **Synthèse des paramètres des correcteurs :**

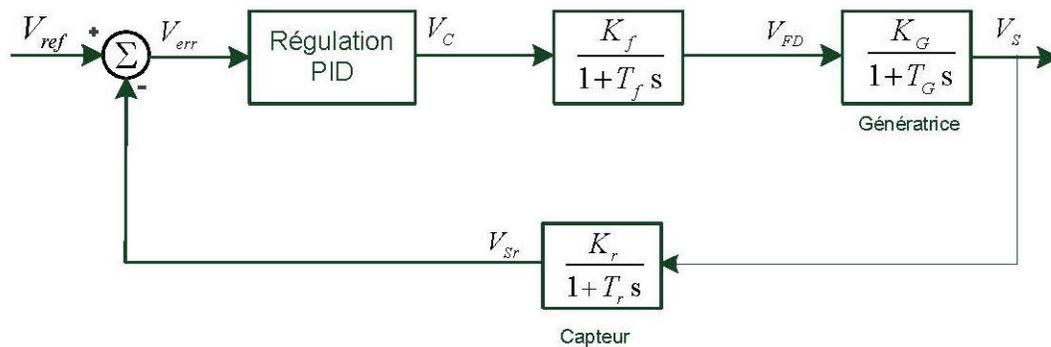


Figure 4-6 Schéma de régulation de tension simplifié

- Méthode par compensation de pôles :

Après simplification du système global précédent (Figure 4-6), le schéma fonctionnel obtenu montré ci-dessus nous permet de calculer aisément les paramètres du correcteur PID, en utilisant la méthode par compensation de pôles.

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

$$G_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_P \left(\frac{1 + T_I s + T_I T_D s^2}{T_I s} \right) \quad (4.3)$$

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

$$F_T(s) = \frac{K_f K_G}{(1 + T_f s)(1 + T_G s)} = \frac{K'}{1 + (T_f + T_G)s + T_f T_G s^2} \quad (4.4)$$

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

$$T_I = T_f + T_G \quad , \quad T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \quad (4.5)$$

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

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{BO}}{T_I s} \quad (4.6)$$

Avec $K_{BO} = K_P K_f K_G$

En boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)H(s)}{1 + G_{BO}(s)H(s)} \quad (4.7)$$

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

$$H(s) = \frac{K_r}{1 + T_r s} \quad (4.8)$$

En remplaçant les équations (4.6) et (4.8) dans (4.7), on déduit la fonction de transfert du système globale en boucle fermée :

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

$$\Rightarrow F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_I}{K_{BO} K_r}\right)s + \left(\frac{T_I T_r}{K_{BO} K_r}\right)s^2} \quad (4.9)$$

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

$$F(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right)s + \left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2} \quad (4.10)$$

Tel que ε et ω_n représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système.

Par superposition entre les deux fonctions de transferts $F_{BF}(s)$ équation (4.9) et $F(s)$ équation (4.10) on aura :

$$\frac{T_I}{K_{BO}K_r} = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} \quad (4.11)$$

$$\frac{T_I T_r}{K_{BO}K_r} = \frac{1}{\omega_n^2} \quad (4.12)$$

$$(4.11) \Rightarrow \omega_n = \frac{2K_{BO}K_r\varepsilon}{T_I} \quad (4.13)$$

$$(4.12) \Rightarrow K_{BO} = \frac{T_I T_r \omega_n^2}{K_r} \quad (4.14)$$

En remplaçant (4.13) dans (4.14), on obtient :

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

On déduit alors les gains :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_P = \frac{(T_f + T_G)T_r \omega_n^2}{K_r K_f K_G} \\ \text{ou} \\ K_P = \frac{(T_f + T_G)}{4K_f K_G T_r K_r \varepsilon^2} \end{array} \right. , \quad K_I = \frac{1}{T_f + T_G}, \quad K_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \quad (4.15)$$

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

- Fonction de transfert simplifiée de la Génératrice synchrone [1] :

$$G(s) = \frac{K_G}{(1 + sT_G)} \quad (4.16)$$

Le calcul de K_G et T_G se fait comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = K_G \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{d_0})(1 + sT''_{d_0})} ; \quad \Delta\psi ds = G(s) * efd \\ K_G = \frac{x_{md}}{r_f}, T'_{d_0} = \frac{x_{md} + x_f + x_{kf1}}{r_f} \end{array} \right. \quad (4.17)$$

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

T_{kd} et T''_{d_0} sont négligées [1].

- Fonction de transfert de l'amplificateur :

$$G_f(s) = \frac{K_f}{(1 + sT_f)} \quad (4.18)$$

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

$$\overline{V_{SDC}} = 1.35 \overline{V_{Sab_eff}} \cos(\alpha)$$

$$\begin{cases} V_f = 1.35V_2 \cos(\alpha) = 1.35K_e V_G \cos(\alpha) \\ V_c = V_{tb} \cos(\alpha) = K_{tb} V_G \cos(\alpha) \end{cases} \quad (4.19)$$

Où : V_f est la tension d'excitation (en courant continu), V_2 la valeur efficace de la tension secondaire du transformateur utilisé, V_c tension corrigée à la sortie du régulateur PID, et V_{tb} définit la tension génératrice maximale (V_{base}). Et $K_e = \frac{V_2}{V_G}$ et $K_{tb} = \frac{V_{tb}}{V_G}$ représente respectivement le ratio entre excitation/transformateur et le ratio entre génératrice/transformateur [2].

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

$$V_f = 1.35K_e V_G \frac{V_c}{K_{tb} V_G} = K_f V_c \quad (4.20)$$

On déduit alors,

$$K_f = 1.35 \cdot \frac{K_e}{K_{tb}} \quad (4.21)$$

Et la constante de temps

$$T_f = \frac{T}{2} = \frac{T_e/6}{2} = \frac{T_e}{12} \quad (4.22)$$

Tels que :

α : Angle d'amorçage des thyristors

T : Période du signal filtré

T_e : Période du signal d'entrée

4.3 Régulation de la vitesse de rotation

Le schéma ci-dessous (Figure 4-7) montre le principe de la régulation de la vitesse de rotation et la puissance mécanique d'un groupe turbine hydraulique-alternateur. La boucle de régulation est composée généralement d'un régulateur (*governor*), d'un servomoteur et d'une turbine.

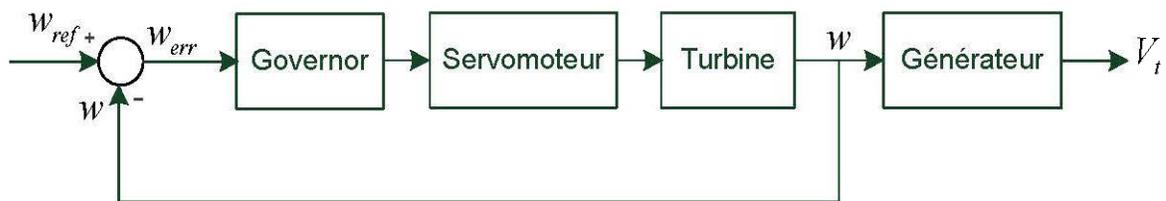


Figure 4-7 Principe de la régulation de la vitesse

Le régulateur (*governor*) est souvent représenté par un régulateur classique PID [5] (Proportionnel, intégral et dérivée) dans la Figure 4-8. Le PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale. Le statisme a pour rôle le partage de la charge totale du réseau entre différents générateurs s'il y a lieu. Il permet aussi d'assurer le bon fonctionnement de plusieurs turbines dans un réseau électrique. Un exemple de calcul des paramètres K_p , K_i et K_d du régulateur PID classique de vitesse est donné en (Annexe 4).

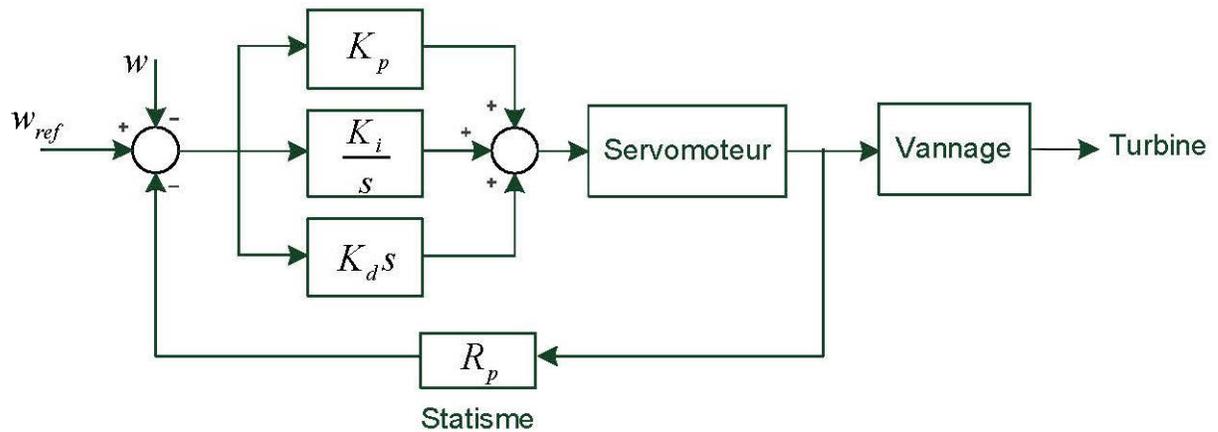


Figure 4-8 Régulateur de vitesse type PID

Le modèle du servomoteur est décrit par une fonction de transfert simple du premier ordre $\frac{K_a}{T_a s + 1}$ semblable à celle d'un moteur. Il génère la vitesse de rotation de la turbine en commandant l'ouverture du vannage. Il est représenté dans le schéma suivant [27] :

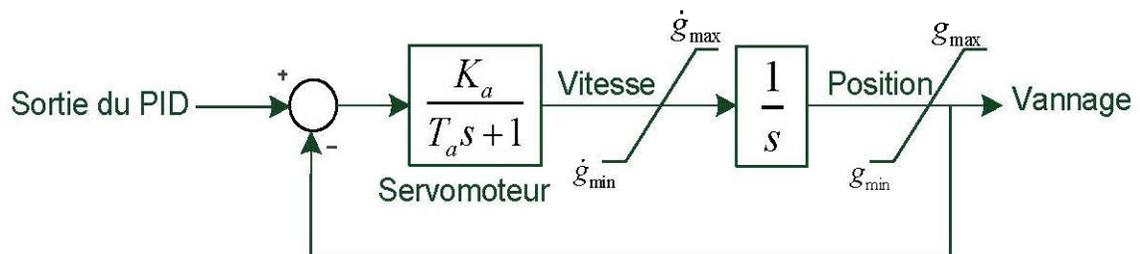


Figure 4-9 Schéma bloc du Servomoteur

4.4 Stabilisateur de puissance

Le stabilisateur de puissance (PSS) permet en principe d'amortir les oscillations de puissances. Il fonctionne avec le régulateur automatique de tension (AVR) en ajoutant une entrée supplémentaire au système d'excitation. La Figure 4-10 illustre la configuration générale d'un PSS avec un système d'excitation de type ST1 de IEEE. Le stabilisateur de puissance utilise comme entrée l'écart entre la vitesse de la machine et la vitesse nominale $w - w_{ref}$ et a pour sortie la tension de stabilisation V_{Stab} [10] [24].

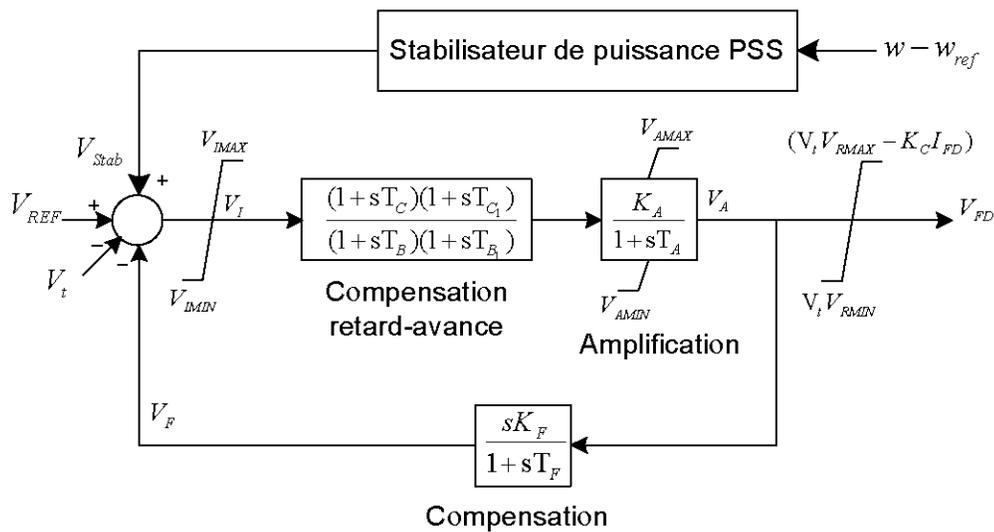


Figure 4-10 Système d'excitation type ST1 avec PSS

Il existe plusieurs types de stabilisateurs utilisés dans la commande des réseaux électriques. Le plus important est le modèle conventionnel à une entrée type IEEE PSS1A [24] [28] présenté en Figure 4-11, il est constitué d'un gain K_{stab} qui détermine le niveau d'amortissement du PSS, d'un filtre passe-haut qui va permettre au PSS

d'agir seulement en cas de variation rapide de vitesse et éliminer l'action de ce dernier lorsque la vitesse de la machine est constante et enfin un compensateur de phase.

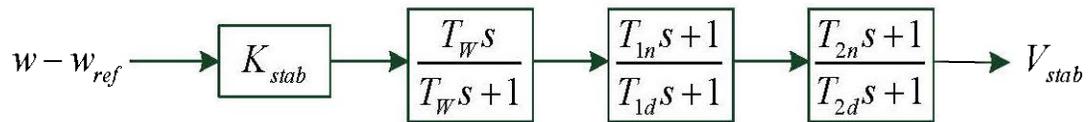


Figure 4-11 Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS1A

Le schéma suivant (Figure 4-12) montre la régulation globale dans les différents blocs du système (groupe Turbine hydraulique – Alternateur synchrone avec leurs système d'excitation ST1).

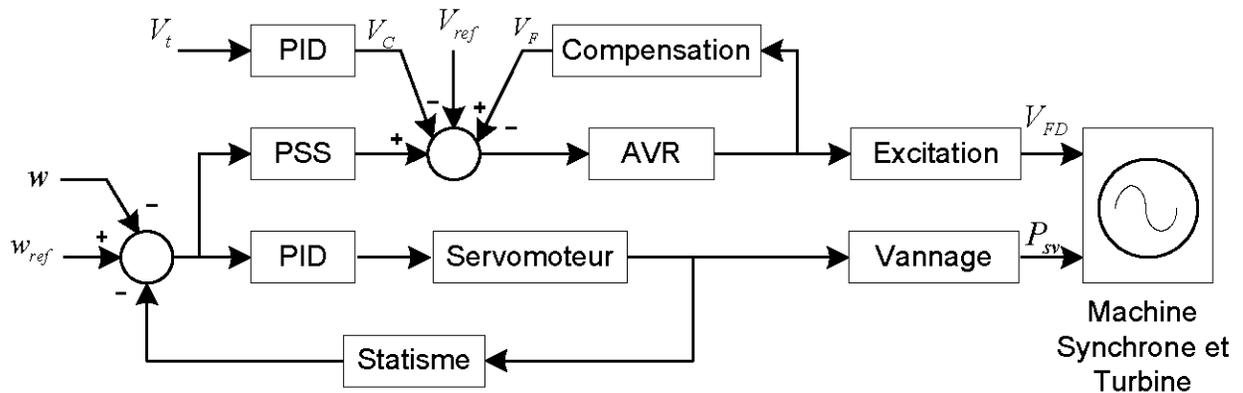


Figure 4-12 Schéma de la régulation globale

4.5 Conclusion

L'action de contrôle des grandeurs de sortie d'un groupe turbine-alternateur est donc obtenue par deux niveaux de régulations principales, soit les régulateurs de tension et de vitesse (voir Figure 4-12), ajoutant à cela un stabilisateur de puissance (PSS) qui agit pour fin de l'amortissement des oscillations de puissances électromécaniques [9]. Cependant l'interaction entre le régulateur de tension (AVR) et le stabilisateur de puissance (PSS) qui opèrent simultanément au niveau du système d'excitation, peut compromettre la performance dynamique entre leurs deux fonctions (contrôle de la tension et amortissement de la puissance) [24] [28]. Pour remédier à tout inconvénient pouvant survenir à ce niveau, un travail d'optimisation des paramètres de l'excitatrice sera effectué.

Dans le chapitre 5, nous allons alors présenter la méthode d'optimisation la plus adaptée dans ce cas-ci, dite optimisation par algorithme génétique afin d'assurer le contrôle optimale des grandeurs de sortie, et améliorer les performances dynamiques du groupe-turbine alternateur du simulateur analogique.

CHAPITRE 5

OPTIMISATION PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE

5.1 Introduction

Ce chapitre présente la partie optimisation, où est défini la méthode et la technique d'optimisation utilisée, appelée méthode d'optimisation par algorithmes génétiques.

Ce choix est justifié par la nécessité de trouver l'optimum global d'un problème d'optimisation qui comprend des variables continues ou discrètes, et qui est représenté sous forme d'un système (système d'excitation statique ST) dont le modèle est non linéaire, non dérivable ou ne possédant pas d'expressions analytiques. L'optimisation par algorithmes génétiques est la méthode la mieux adaptée dans ce cas-ci, car elle prend en compte toutes les différentes contraintes d'optimisations, et de plus de sa robustesse, elle offre souvent des résultats très fiables.

5.2 Technique d'optimisation par algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation. Ils tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin. Tels que les « individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (*the survival of the fittest*); Michalewicz *et al.*, 1999; Tomassini, 1999) [29].

Par analogie avec l'évolution naturelle, les AG font évoluer un ensemble de solutions candidates, appelé une « population d'individus ». Un « individu » n'est autre qu'une solution possible du problème à résoudre. Chaque individu de cette population se voit attribuer une fonction appelée fonction d'adaptation (*fitness*) qui permet de mesurer sa qualité ou son poids; cette fonction d'adaptation peut représenter la fonction objectif à optimiser. Ensuite, les meilleurs individus de cette population sont sélectionnés, subissent des croisements et des mutations et une nouvelle population de solutions est produite pour la génération suivante. Ce processus se poursuit, génération après génération, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint, comme par exemple le nombre maximal de générations.

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories (Coello Coello *et al.*, 2002) : énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation (Goldberg, 1989; 1994) [30] [31] :

- ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.
- ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions).

- ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

5.2.1 Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions). Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération ($t+1$), chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. La Figure 5-1 présente l'organigramme d'un AG standard [31].

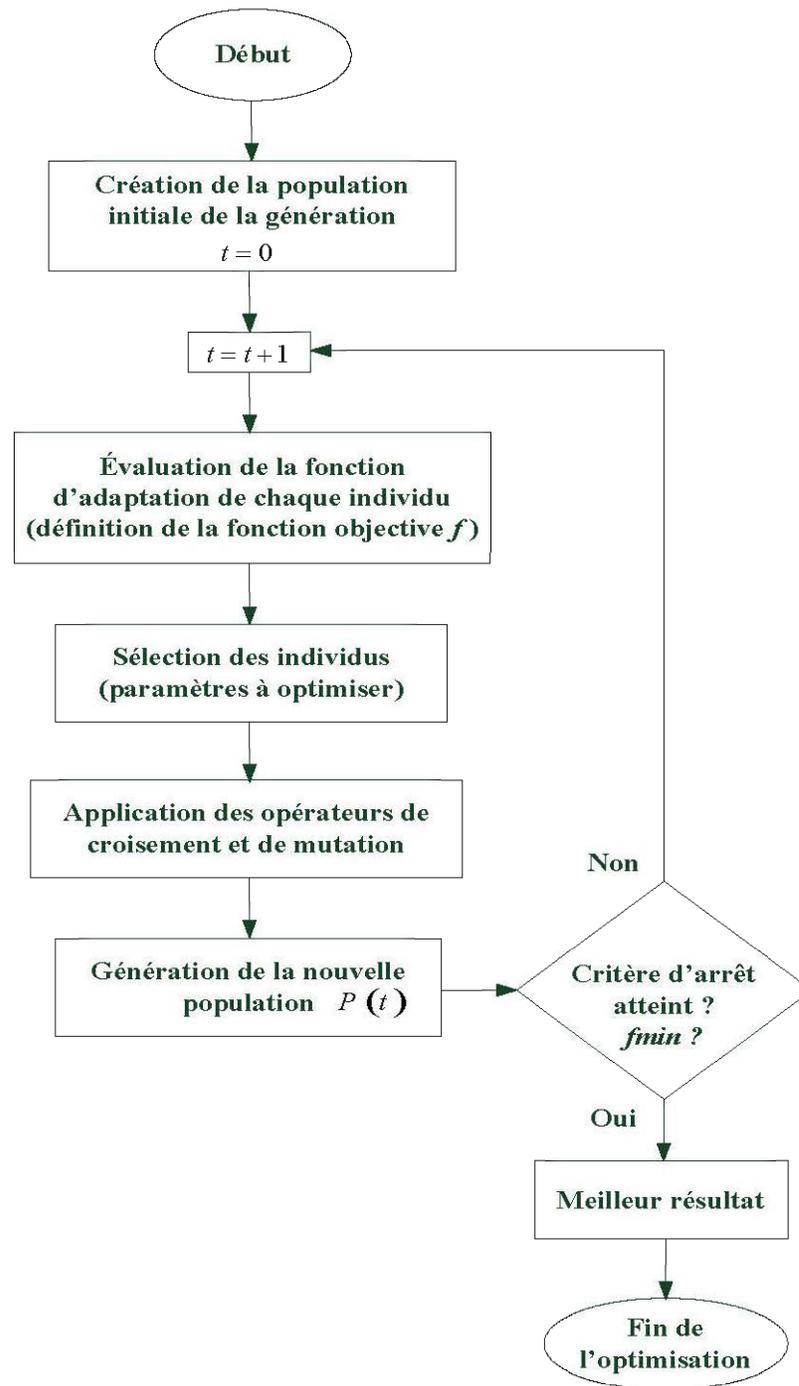


Figure 5-1 Organigramme d'un AG standard

5.2.2 Codage des variables dans un AG

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétiques. Il permet de représenter l'individu sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué de gènes qui prennent des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Certains auteurs n'hésitent pas à faire le parallèle avec la biologie et parlent de *génotype* en ce qui concerne la représentation binaire d'un individu, et de *phénotype* pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche [29].

Le choix du codage est délicat. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs type de codages sont utilisés, on citera à titre d'exemple: codage réel, codage binaire, Gray [31].

Le codage binaire a pour principe de coder la solution selon une chaîne de bits qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1. Ce type de codage est le plus utilisé. Il présente l'avantage d'être facile et permet de coder toutes sortes d'objets : des réels, des entiers, des chaînes de caractères, etc.

5.2.3 Opérateurs d'un algorithme génétique

Trois type d'opérateurs sont utilisés dans les AG; la sélection, le croisement et la mutation. Et il existe plusieurs méthodes pour chacun des opérateurs [31] [32].

5.2.3.1 Opérateur de sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire sur la base de la fonction d'adaptation, de telle sorte que les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins adaptés sont écartés. Cet opérateur favorise alors les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser), qui dans notre cas, est simplement défini par la valeur de la fonction objectif.

Cependant, il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues sont : « la roue de la fortune » ou par roue biaisée, et « la sélection par tournoi » (*tournament selection*). Nous citerons aussi la sélection par la méthode « élitiste », et la sélection stochastique.

5.2.3.2 Opérateur de croisement

Les opérateurs de croisement dans un AG sont conçus par analogie à la propriété naturelle d'hybridation de l'ADN. Cet opérateur combine les gènes de deux individus parents pour donner deux nouveaux chromosomes d'individus enfants (descendants) possédant des caractéristiques issues des deux parents. La zone de croisement est généralement choisie aléatoirement dans les chromosomes, et les méthodes de croisement sont liées au codage mais leur principe est identique. Le croisement permet d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes (Chipperfield et al. 1994), comme il favorise aussi l'exploration de l'ensemble des solutions possibles, il s'agit alors de la phase d'*intensification* de la recherche.

De nombreux types de croisement existent dans la littérature. Ils préservent plus ou moins l'identité génétique des parents et permettent un déplacement dans tout l'espace des solutions. Les types de croisement les plus usuels sont : croisement en 1 point, en 2 points, et le croisement uniforme.

Le croisement utilisé avec les chaînes de bits est le croisement à découpages de chromosomes qui se fait en trois étapes [31]. Au départ, deux solutions P1 et P2 appelées parents sont sélectionnées en fonction de leurs performances. Puis, on tire aléatoirement une position inter-gènes dans chacun des parents (point de croisement Pt). Enfin, on échange les deux sous-chaînes de chacun des chromosomes, ce qui produit deux autres solutions E1 et E2 appelées enfants (Figure 5-2).

Pour chaque couple, un nombre aléatoire P est tiré dans l'intervalle $[0,1]$ et comparé ensuite avec la probabilité de croisement P_c :

- si $P > P_c$, le couple ne subit pas de croisement et un clonage de chromosome aura lieu. Les deux enfants produits sont ainsi une copie de leurs parents.
- si $P < P_c$, le croisement a lieu et un échange des parties des chromosomes des parents va produire deux enfants par couple de parents.

Ce mécanisme présente l'inconvénient de privilégier les extrémités des individus ce qui peut générer des fils plus ou moins proches de leurs parents. Pour éviter ce problème, on peut étendre ce principe en découpant le chromosome en 3 sous-chaînes comme illustré sur la Figure 5.3 ou encore en plusieurs sous chaînes.

Le croisement peut, aussi, se faire d'une manière uniforme. Chaque gène des individus enfants est créé en copiant le gène correspondant d'un parent, choisi grâce à un masque [32]. Pour chaque couple de parents, un masque binaire est généré

aléatoirement. Comme illustré sur la Figure 5.4, pour chaque gène, lorsque le masque a pour valeur 1, le gène du premier enfant est la copie du gène du premier parent. Lorsqu'il a pour valeur 0, le gène du premier enfant est la copie du gène du second parent. Cet opérateur de croisement favorise les recombinaisons complexes de gènes entre les individus appariés.

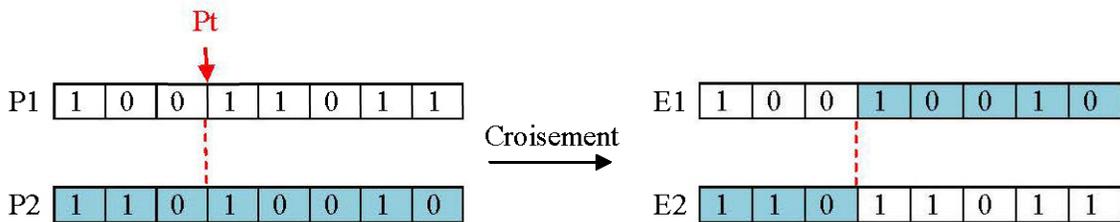


Figure 5-2 Croisement en 1 point (codage binaire)

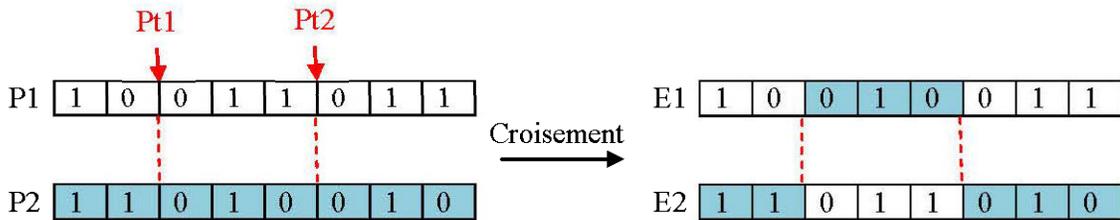


Figure 5-3 Croisement en 2 points (codage binaire)

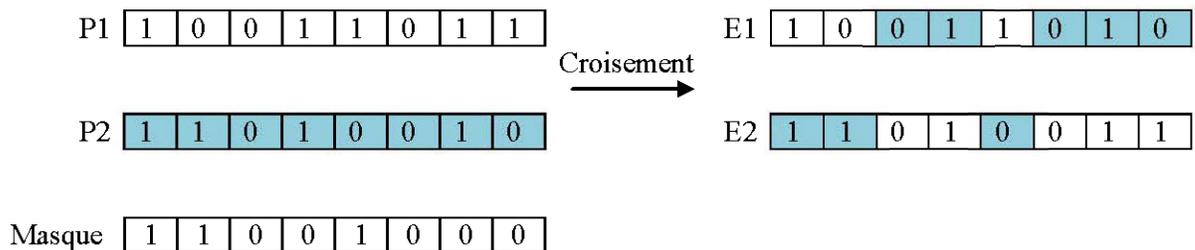


Figure 5-4 Croisement uniforme (codage binaire)

Le croisement est géré par le seul coefficient de croisement. Un tirage aléatoire est réalisé et s'il est inférieur au coefficient de croisement alors un croisement a lieu entre deux individus de la population parente. Classiquement, le coefficient de croisement est compris entre 0,7 et 0,9 pour un algorithme codé en réel. Dans le cas contraire les enfants sont des copies des parents.

5.2.3.3 Opérateur de Mutation

Les mutations sont primordiales dans le processus de convergence vers l'optimum global. Elles permettent d'aller explorer l'espace des solutions de manière aléatoire. Ainsi, on évite de rester piégé par un optimum local ; il s'agit de la phase de *diversification* de la recherche. La mutation consiste à créer un individu fils à partir d'un individu parent en faisant évoluer aléatoirement tout ou une partie des gènes de ce dernier. Théoriquement, les mutations permettent à elles seules de faire converger l'algorithme.

Elles sont gérées par le seul coefficient de mutation. Son principe d'application est le même que celui du coefficient de croisement, ça consiste à modifier, avec une probabilité P_m faible, certains bits des chromosomes. Nous tirons tout d'abord pour chaque bit un nombre aléatoire P dans l'intervalle $[0,1]$. Puis, nous le comparons avec une probabilité de mutation P_m donnée :

- Si $P > P_m$, le bit ne subira pas de modification.
- Si $P < P_m$, la mutation est appliquée au bit correspondant.

Comme pour les croisements, de nombreuses méthodes de mutation ont été développées dans la littérature mais l'une des plus efficaces est celle qui consiste à muter chaque paramètre de la fonction à optimiser avec une probabilité dépendant des informations contenues dans les gènes des individus. Dans le cas du codage binaire, chaque bit est remplacé selon la probabilité P_m par son inverse. C'est ce qu'illustre la Figure 5-5.

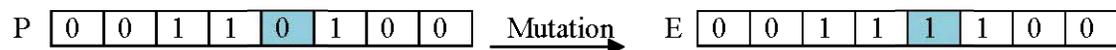


Figure 5-5 Représentation d'une mutation de bit dans une chaîne (codage binaire)

5.3 Optimisation mono objectif

L'optimisation est dite mono objectif, à cause qu'on a une seule fonction objective à optimiser. Où pour chaque individu de chaque génération, la fonction d'évaluation est calculée puis utilisée plus tard pour choisir les individus qui vont générer la population suivante.

Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une fonction d'évaluation ou d'adaptation F . L'évaluation d'un individu ne dépendant pas de celle des autres individus, le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : c'est le rôle de la fonction (F). Cette procédure permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés [33].

La fonction d'adaptation, associe une valeur pour chaque individu. Cette valeur à pour but d'évaluer le degré d'adaptation d'un individu à son environnement. Les individus peuvent être aussi comparés entre eux. Cette fonction, propre au problème, est souvent simple à formuler lorsqu'il y a peu de paramètres. Au contraire, lorsqu'il y a beaucoup de paramètres ou lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir. Dans ce cas, la fonction devient une somme pondérée de plusieurs fonctions.

La fonction d'adaptation doit exprimer le plus fidèlement possible, la problématique posée sous forme mathématique. Sa définition peut être simplement analytique, ou elle peut éventuellement faire appel au jugement de l'utilisateur. En raison de l'analogie avec la théorie de l'évolution (survie des individus les mieux adaptés à leur environnement), les algorithmes génétiques sont naturellement formulés en terme de maximisation. Ils servent donc à déterminer le maximum d'une fonction F réelle à une ou plusieurs variables. Le problème d'optimisation sur l'espace de recherche E est formulé comme suit :

$$\max_{x \in E} F(x) \quad (5.1)$$

Si le problème à résoudre est un problème de minimisation d'une fonction f .

$$\min_{x \in E} f(x) \quad (5.2)$$

Ceci équivaut au problème de maximisation de $F(x)$, que l'on définit comme suit:

$$F(x) = \frac{1}{1 + f(x)} \quad (5.3)$$

5.4 Conclusion

Les algorithmes génétiques sont des méthodes méta heuristiques d'optimisation globale basées sur des concepts de génétique et de sélection naturelle. Le composant principal des AG est le gène qui se compose d'une chaîne de caractères (souvent binaire). Les gènes s'enchaînent et forment les chromosomes. Ces derniers forment les individus dans l'espace de recherche. Ainsi, les AG travaillent sur une population d'individus, où chacun de ces derniers représente une solution possible pour le problème donné. Dans chaque itération de l'AG, la performance de chaque individu de la population courante est calculée. Les opérateurs de génétiques, sélection, croisement et mutation, sont appliqués successivement pour créer une nouvelle population jusqu'à l'approche rigoureuse de la solution optimale [30] [31].

Les algorithmes génétiques offrent plusieurs avantages :

- Ils ne demandent pas d'informations à priori ou des propriétés particulières de la fonction objectif du problème.
- Leurs performances par rapport aux algorithmes classiques sont bien remarquées lorsque par exemple les espaces de recherches sont importants [34].
- Outre leur facilité de programmation et de manipulation, ils sont facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation.
- Ils peuvent être utilisés avec profit pour traiter des problèmes n'étant pas optimisables efficacement par des approches purement mathématiquement.

CHAPITRE 6

TESTS ET VALIDATION DE LA RÉGULATION (AVR, PID) ET DE L'OPTIMISATION PAR ALGORITHME GÉNÉTIQUE DES PARAMÈTRES D'EXCITATION DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR

6.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents tests et résultats d'application qui valide notre travail. Les résultats des différents niveaux de régulations sont donnés (régulation de tension par AVR, régulation de la vitesse de rotation, stabilisation de puissance par PSS...), ainsi que les simulations de plusieurs tests sur le modèle du système global assemblé et implémenté sous formes de blocs simulink et script matlab.m (voir annexe) ; test d'amorçage des tensions, test de réponse à un saut de tension, ...etc. Les résultats de l'application de la méthode d'optimisation par Algorithme Génétique (sous matlab toolbox pour AG [35]) sont aussi présentés, et comparés aux cas avant optimisation.

Les paramètres de chaque élément du groupe turbine-alternateur sont donnés en tableaux (paramètres de la machine Lab-volts, paramètres de la turbine hydraulique idéale, et paramètres du système d'excitation type ST1).

6.2 Paramètre des différents blocs

✓ Paramètres de la génératrice (Lab-volt) :

<u>Paramètres</u>	<u>Symboles</u>	<u>Valeurs</u>
Puissance apparente	S	120 VA
Tension nominale au stator	V	208 V
Courant maximal au stator	I	0.33 A
Fréquence	f	60 Hz
Vitesse de rotation	N	120 Rpm
- <u>Résistances (pu) :</u>		
Résistance au stator	r_s	0.0198
Résistance de fuite	r_f	0.1983
- <u>Réactances (pu) :</u>		
Synchrones axe d et q	x_d	0.350
	x_q	0.3417
Transitoires axe d et q	x'_d	0.050
	x'_q	0.3417
Sub-transitoires axe d et q	x''_d	0.0295
	x''_q	0.0295
Fuite au stator	x_f	0.0295
Kany	x_{kfl}	-0.0081

Tableau 1: Paramètres de la génératrice synchrone Labvolt

✓ Paramètres initiaux de l'excitatrice statique type ST1A :

Limitation des tensions	$V_{Amax} = 300$	$V_{Amin} = -300$	$V_{Rmax} = 6,4$	$V_{Rmin} = -6,4$
Limitation des courants	$V_{I_{max}} = 4,4$	$V_{I_{min}} = -4,4$	-	-
Rectification	$K_C = 0.04$	$K_{LR} = 1$	-	-
Régulateur automatique de tension (AVR)	$K_A = 1.62$	$K_f = 0,0503$	$K_E = 1$	$T_b = 1$
	$T_A = 0,0087$	$T_f = 0.3774$	$T_E = 0$	$T_c = 1$
Régulateur classique PID	$K_P = 1,13 \cdot 10^{-4}$	$K_I = 6,3496$	$K_d = 0,0082$	
Paramètres du Transformateur de stabilisation (en pu)	$R_t = 0,0159$	$L_1 = 0,006$	$M = 0,8 \cdot 10^{-3}$	

Tableau 2: Paramètres du système d'excitation statique ST1

✓ Paramètres de la turbine hydraulique (Idéale) :

Puissance nominale	P_m	127.4 MW
Vannage	- g max - g0	- Ouverture nominale : 5 pu - Ouverture à vide : 0.02 pu
Débit d'eau nominal	q	85 m ³ /s

Tableau 3 : Paramètres de la turbine hydraulique

6.3 Régulation de la tension d'excitation

Un régulateur automatique de tension AVR est utilisé afin de contrôler et stabiliser la tension d'excitation V_{FD} , comme illustré par le schéma suivant :

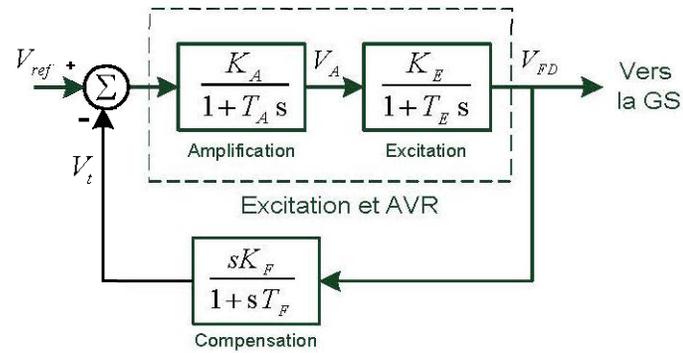


Figure 6-1 Régulation et stabilisation de l'excitation

En utilisant les paramètres initiaux du régulateur automatique de tension AVR, on visualise la tension d'excitation comme suit :

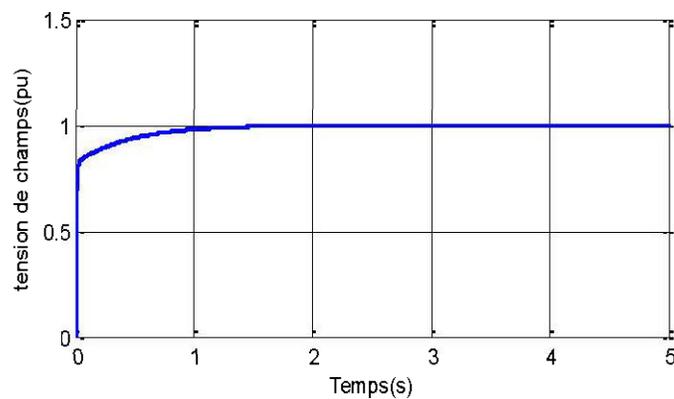


Figure 6-2 Tension d'excitation V_{FD}

6.4 Régulation de la tension de sortie de la génératrice

L'introduction d'un régulateur classique PID est faite dans le but d'assurer une meilleure régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone V_S , où cette dernière est représentée par une fonction de transfert.

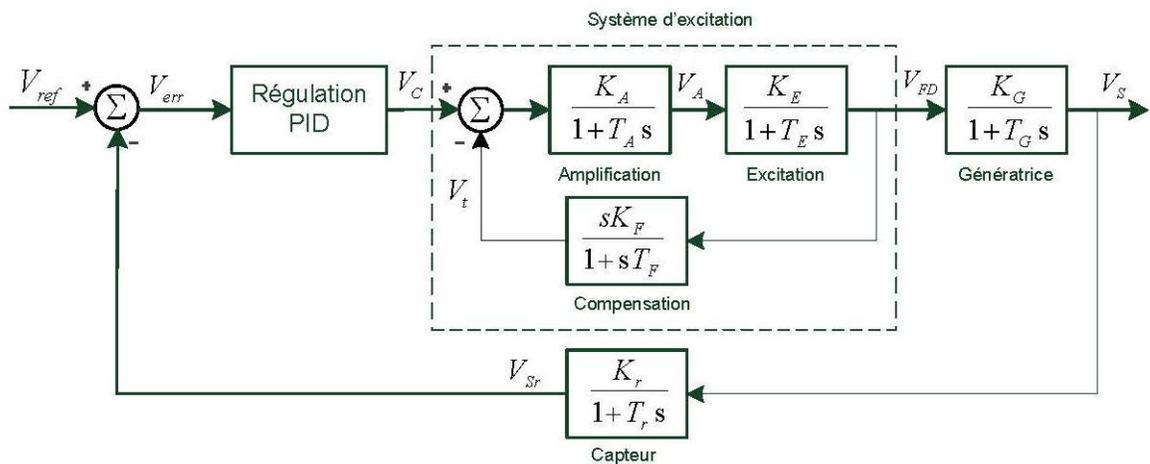


Figure 6-3 Régulation de la tension génératrice V_S

Les variations des tensions de sortie V_{FD} et V_S sont données comme suit :

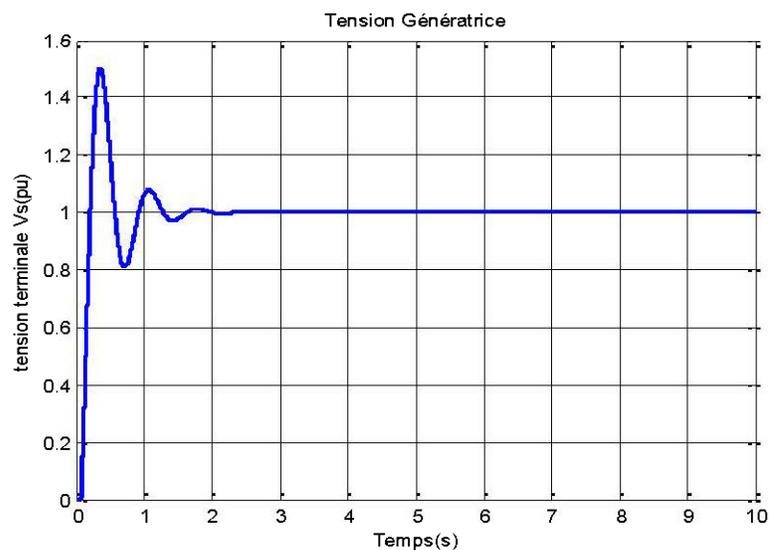


Figure 6-4 Tension génératrice V_S

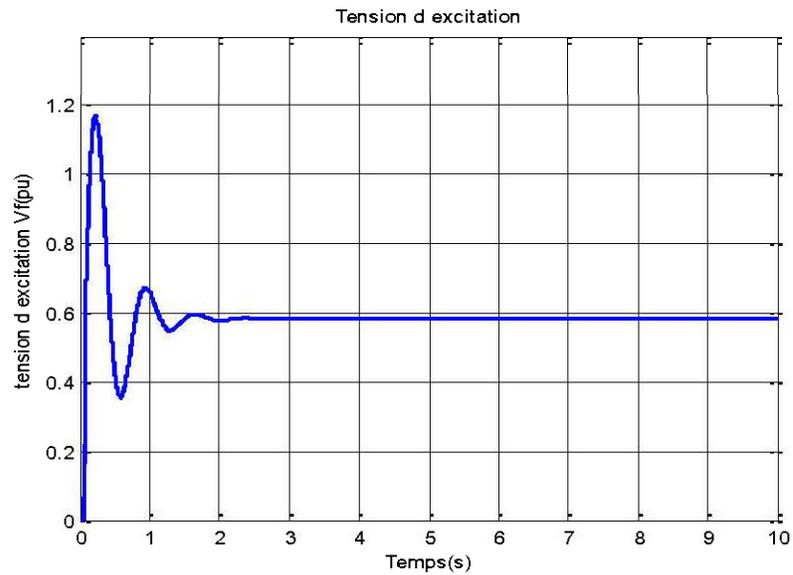


Figure 6-5 Tension d'excitation correspondante V_{FD}

✓ Remarque :

- Réponse concordante entre la tension génératrice V_S et la tension d'excitation V_{FD} (Figure 6-4 et 6-5).
- La régulation par PID classique utilisée révèle quelques dépassements, une bonne précision et une rapidité de réponse satisfaisante (Figure 6-4).

6.5 Régulation des tensions dans le système global

Le modèle hybride de la machine synchrone est assemblé au système d'excitation statique de type ST1. Une représentation schématique est illustrée ci-dessous pour montrer les différents blocs. Et les résultats de simulations sont donnés après implémentation sous matlab simulink.

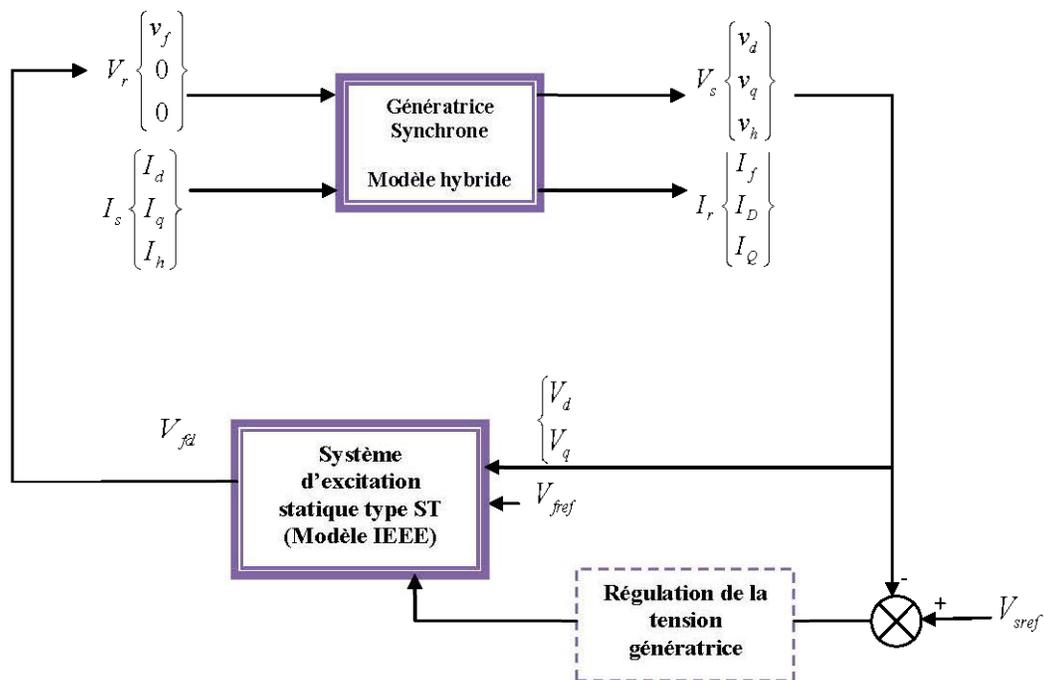


Figure 6-6 Représentation schématique du système global (Génératrice + Excitation)

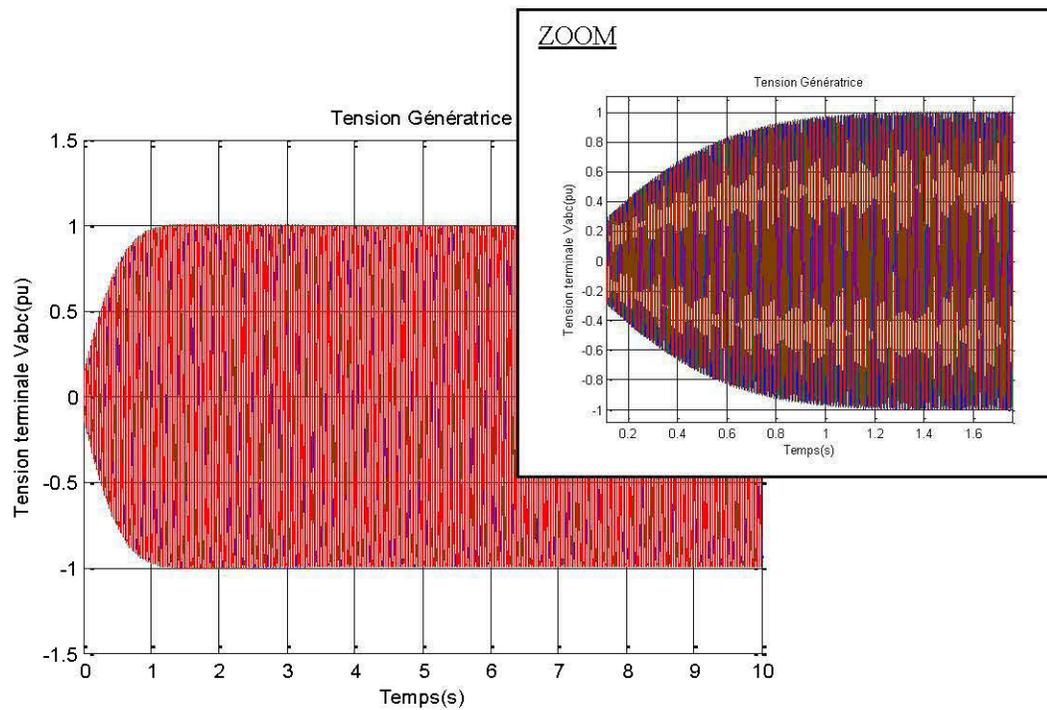


Figure 6-7 Tension de sortie de la génératrice V_{Sabc}

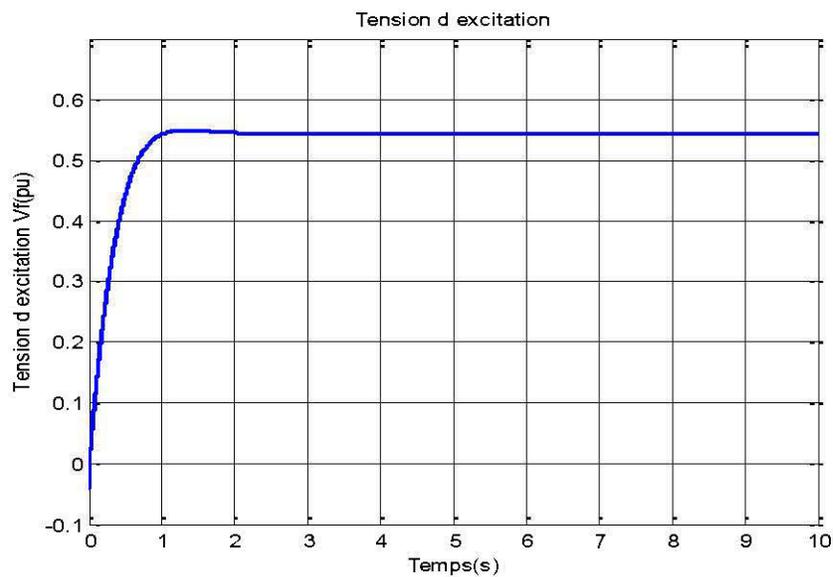


Figure 6-8 Tension d'excitation V_{FD} correspondante

- Les Figures 6-7 et 6-8 montrent un bon amorçage des tensions de sortie, et une concordance entre la tension génératrice V_{Sabc} et la tension d'excitation V_{FD} .

6.6 Tests et simulations sur le système global

6.6.1 Test d'amorçage des tensions de sortie

En déconnectant les courants d'entrée $I_{S_{abc}}$ (courants à vide), les tensions V_{FD} et $V_{S_{abc}}$ sont visualisées et données comme suit :

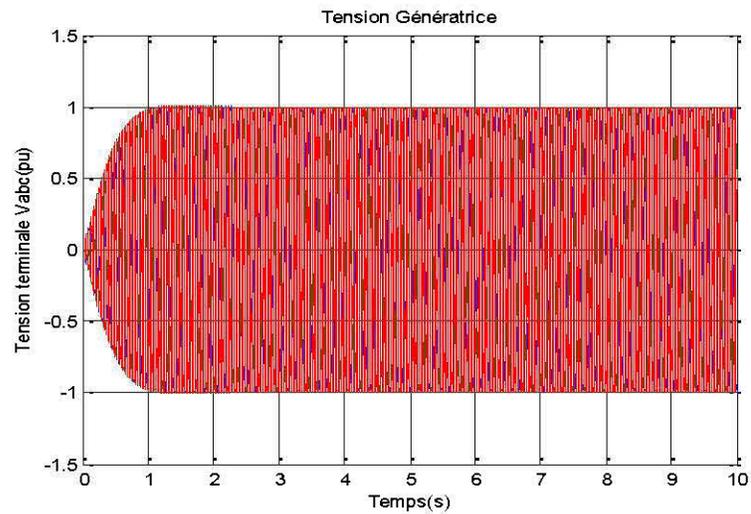


Figure 6-9 Tension de sortie de la génératrice $V_{S_{abc}}$

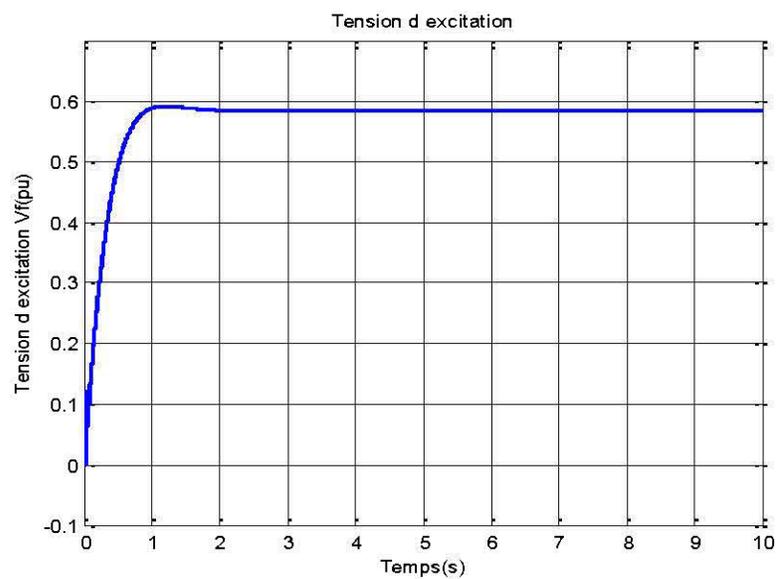


Figure 6-10 Tension d'excitation V_{FD} correspondante

Les variations des puissances sont observées et affichées :

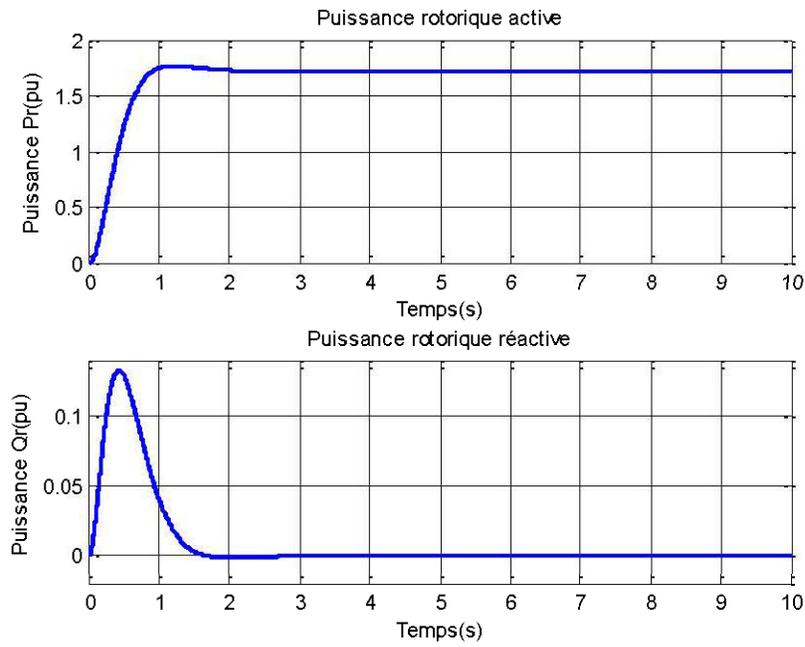


Figure 6-11 Puissances au rotor

6.6.2 Tests - réponse à une variation de tension

Afin de démontrer la variation de la tension génératrice ainsi que sa tension d'excitation correspondante, des tests de réponse à un échelon ont été effectués. Les puissances relatives sont aussi visualisées.

- ✓ Augmentation de tension (échelon croissant de 0.5 pu à 1 pu, à t=5s)

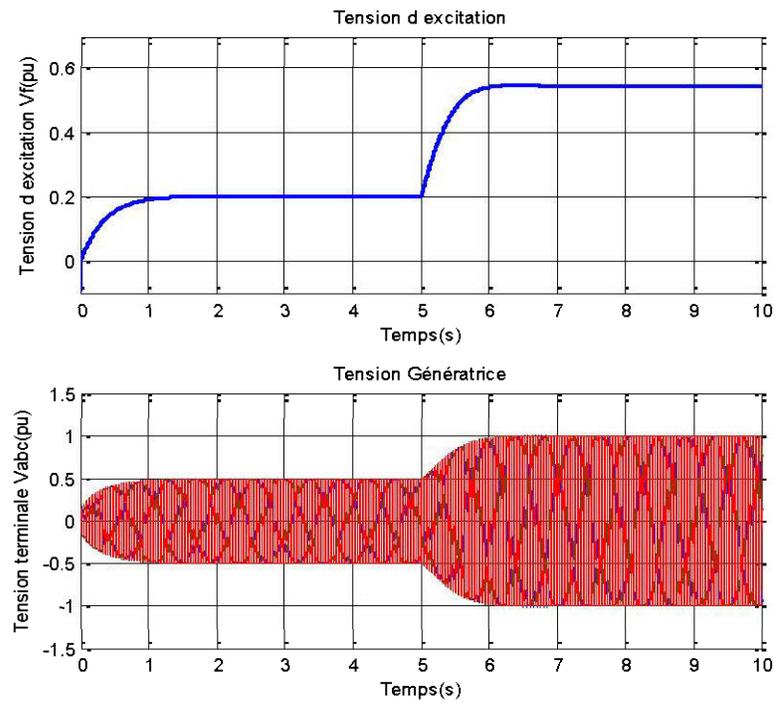


Figure 6-12 Tension d'excitation V_{FD} et tension de sortie V_{Sabc}

- Les puissances relatives sont présentées comme suit :

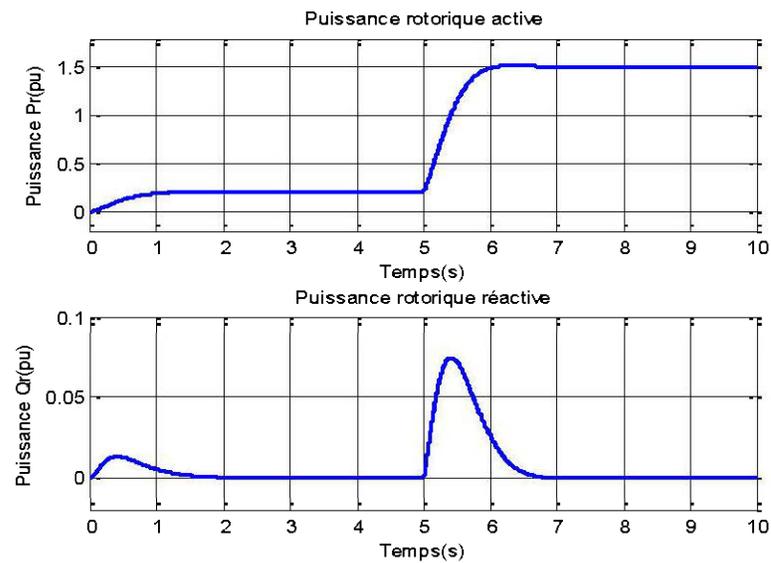


Figure 6-13 Puissances au niveau du rotor

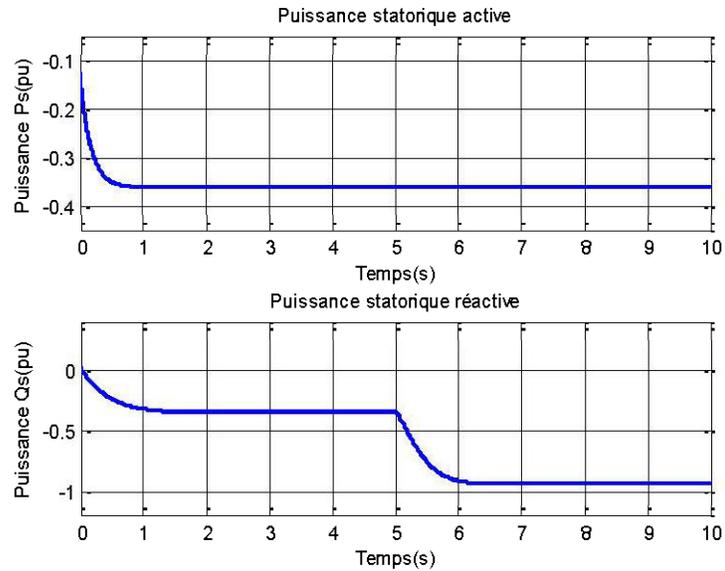


Figure 6-14 Puissances au niveau stator

✓ Teste : Diminution de tension : (échelon décroissant de 1 pu à 0.5 pu, à t =5s)

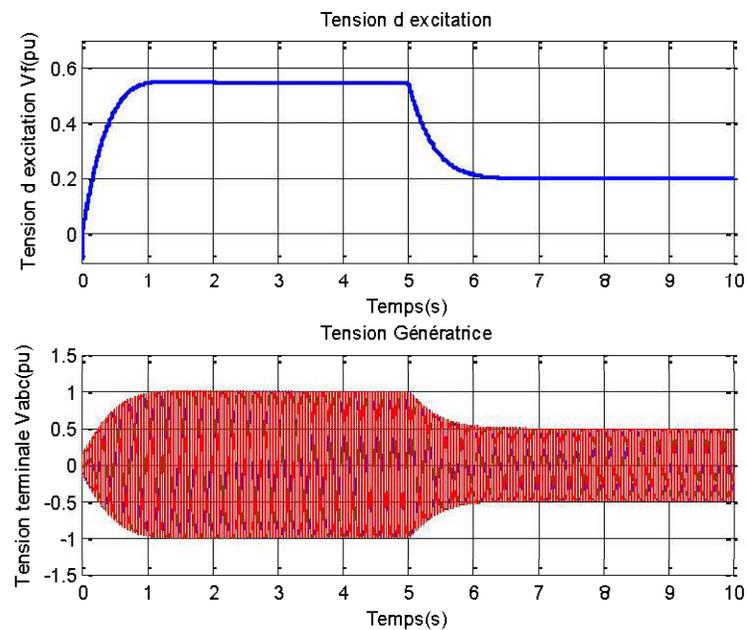


Figure 6-15 Tension d'excitation V_{FD} et tension de sortie V_{Sabc}

Les puissances correspondantes sont affichées comme suit :

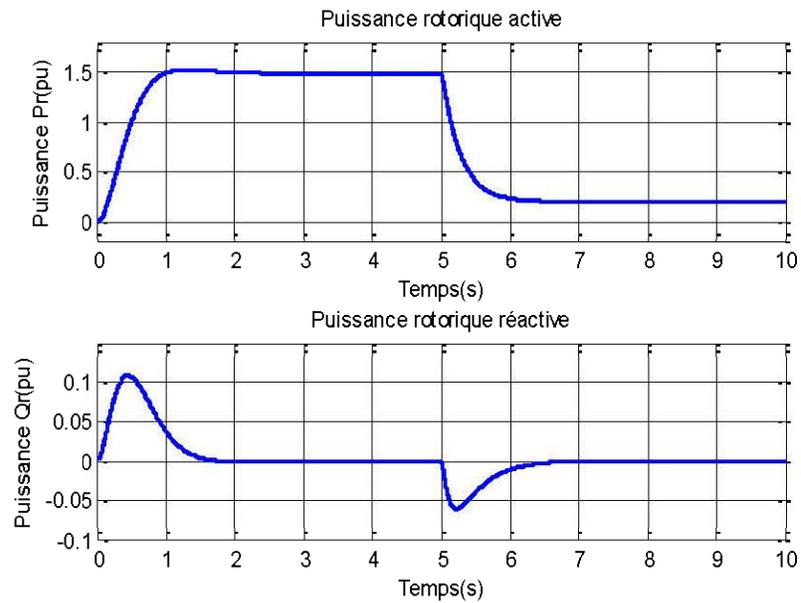


Figure 6-16 Puissances au niveau du rotor

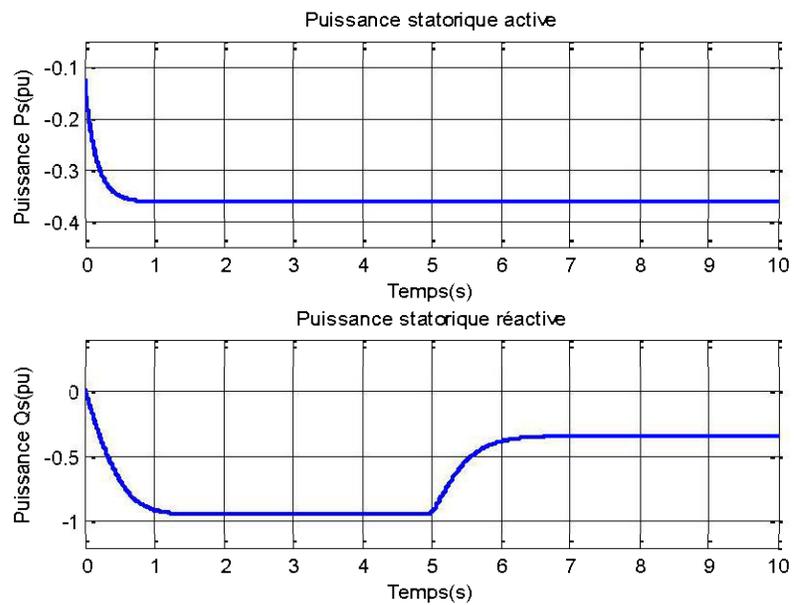


Figure 6-17 Puissances au niveau du stator

✓ Remarques et discussions :

Les tests effectués montrent que la régulation de la tension génératrice triphasée V_{Sabc} présente une bonne performance en termes de précision et de stabilité (Figure 6-9, 6-12 et 6-15).

Cependant on remarque un léger retard avant d'atteindre la valeur de référence au niveau de la tension d'excitation V_{FD} (Figure 6-10).

La parfaite concordance entre la tension génératrice et la tension d'excitation est bien évidente.

Les puissances électriques au niveau du rotor et stator évoluent aussi en correspondance avec la régulation de la tension d'excitation ainsi que la tension génératrice (Figure 6-11, 6-13, 6-14, 6-16 et 6-17).

6.7 Régulation de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique

Afin de réguler la vitesse de rotation et la puissance mécanique, un PID classique est choisi (voir chapitre 2), selon le schéma fonctionnel suivant :

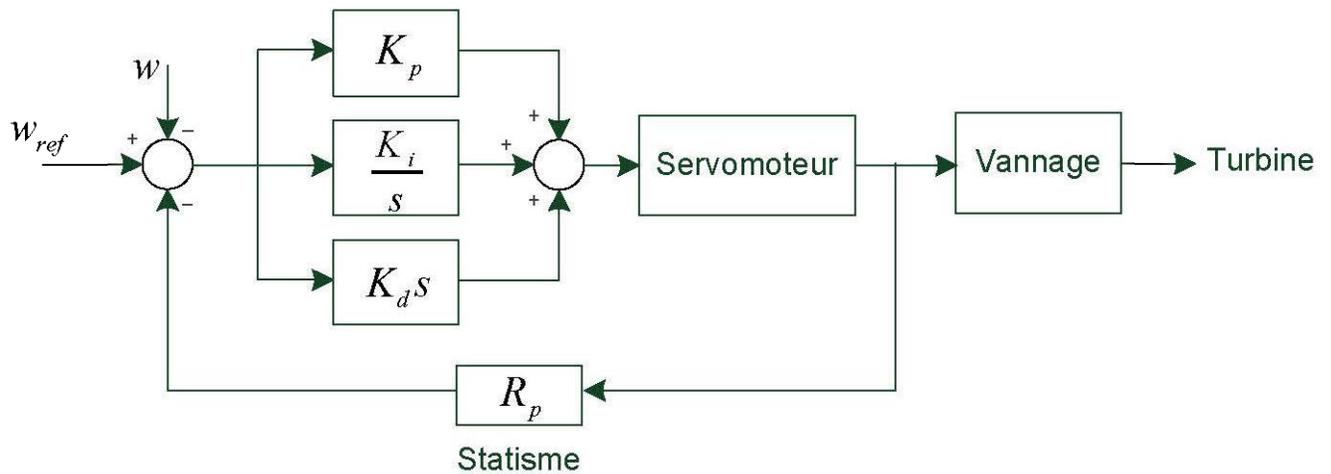


Figure 6-18 Régulateur de vitesse type PID

La méthode de calcul des paramètres du régulateur PID (par compensation de pôles) est donnée en (annexe 4).

- Formulation de la vitesse :

$$\begin{cases} \omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \\ \Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - K_d \Delta\omega(t) \end{cases}$$

En utilisant les paramètres d'une turbine hydraulique idéale les plus usuelles (Tableau 3), les résultats de simulation sont donnés sur les figures ci-dessous :

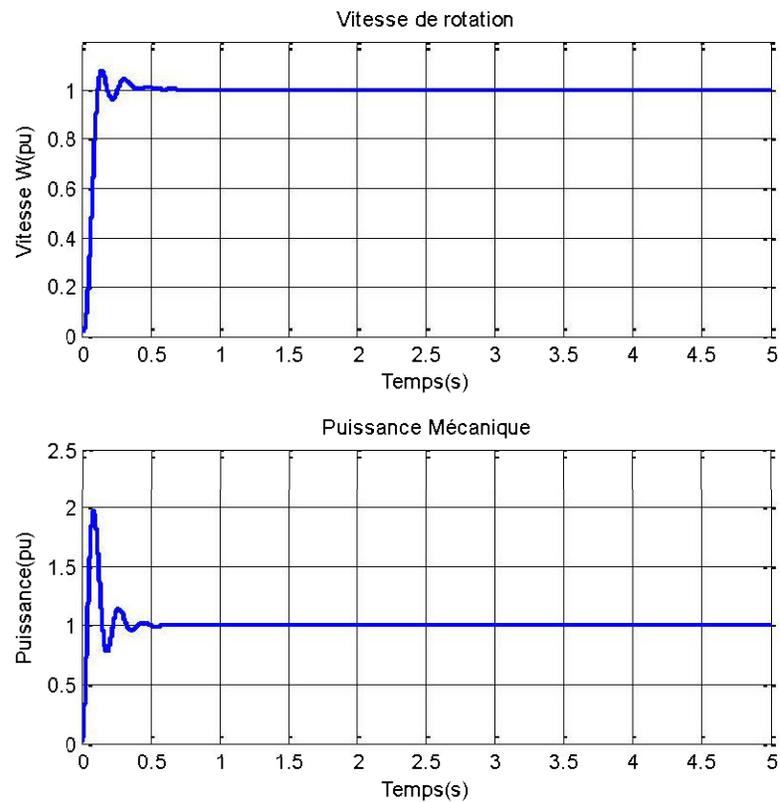


Figure 6-19 Vitesse de rotation de la turbine ω , et puissance mécanique P_m

- Selon la Figure 6-19, la vitesse de rotation ainsi que la puissance mécanique suivent parfaitement la consigne grâce au régulateur PID, avec quelques dépassements.

L'ouverture du vannage g et le débit d'eau q correspondants sont comme suit :

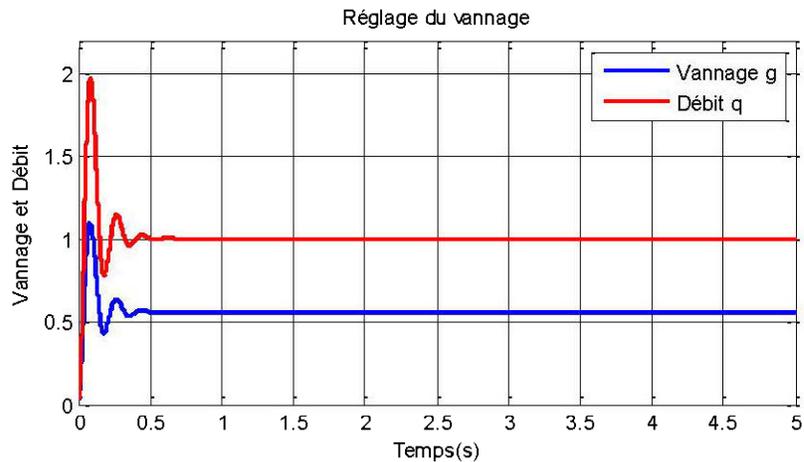


Figure 6-20 Ouverture de vannage g et débit d'eau q associés

L'erreur de vitesse est illustrée comme suit :

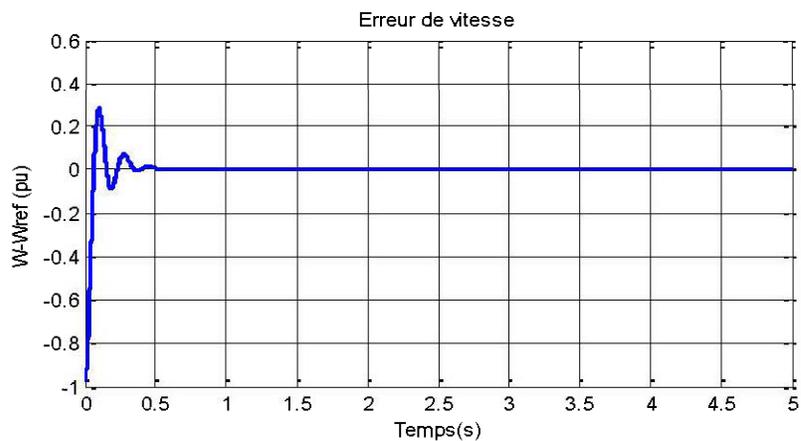


Figure 6-21 L'écart de vitesse $\omega - \omega_{ref}$

- L'ouverture de vannage g et le débit d'eau q montre une bonne symétrie avec la puissance et la vitesse de rotation (Figure 6-19 et 6-20). Et l'erreur de vitesse s'annule assez vite (0.5s) Figure 6-21, ce qui justifie une réponse rapide.

6.8 Stabilisation de puissance

Dans le but de remédier à l'amortissement des oscillations de puissances, et d'avantage la stabilisation de la tension d'excitation, un PSS1A de type IEEE est ajouté au niveau de la boucle de régulation des tensions (voir chapitre 2).

La régulation globale dans les différents blocs du système (groupe Turbine hydraulique – Alternateur synchrone avec leurs système d'excitation ST1), sont alors présenté par le schéma suivant :

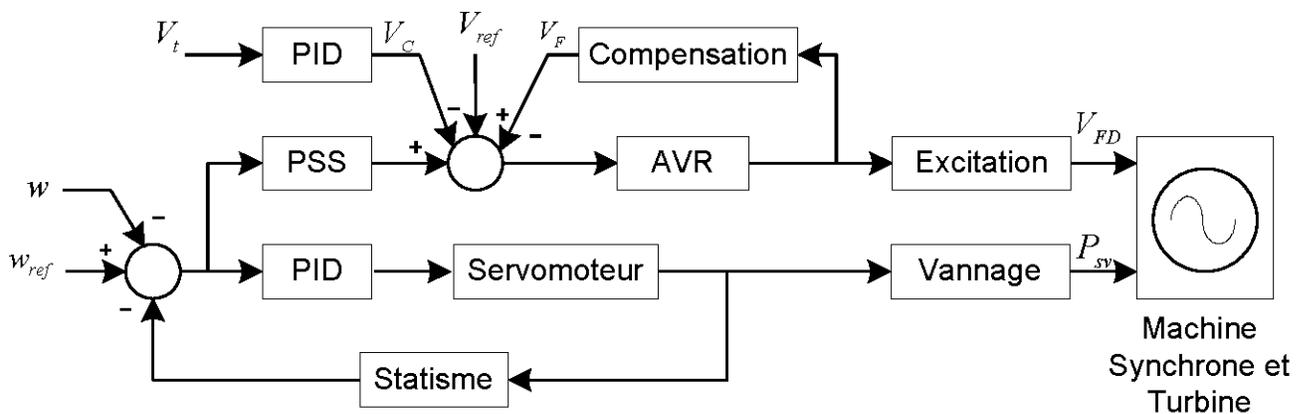


Figure 6-22 Schéma de la régulation globale

Le rôle du stabilisateur de puissance PSS est démontré dans les figures suivantes :

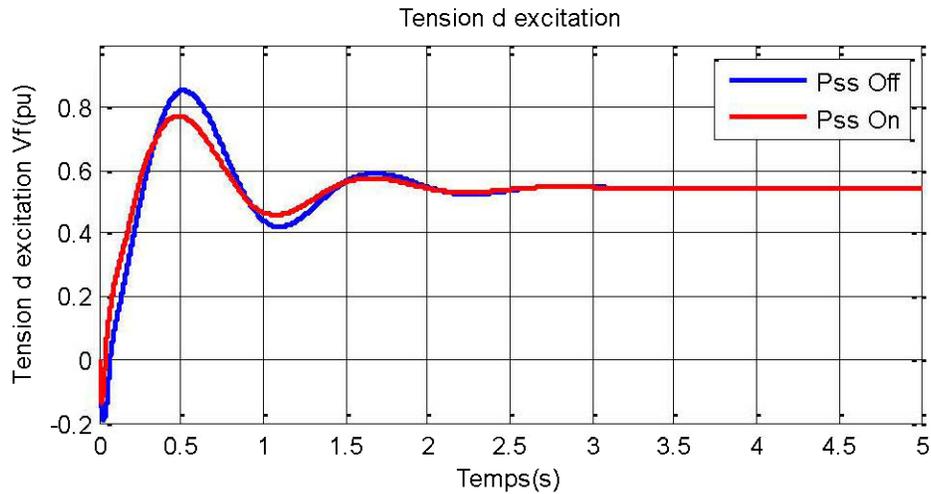


Figure 6-23 Variation de la tension d'excitation V_{FD} avec et sans PSS

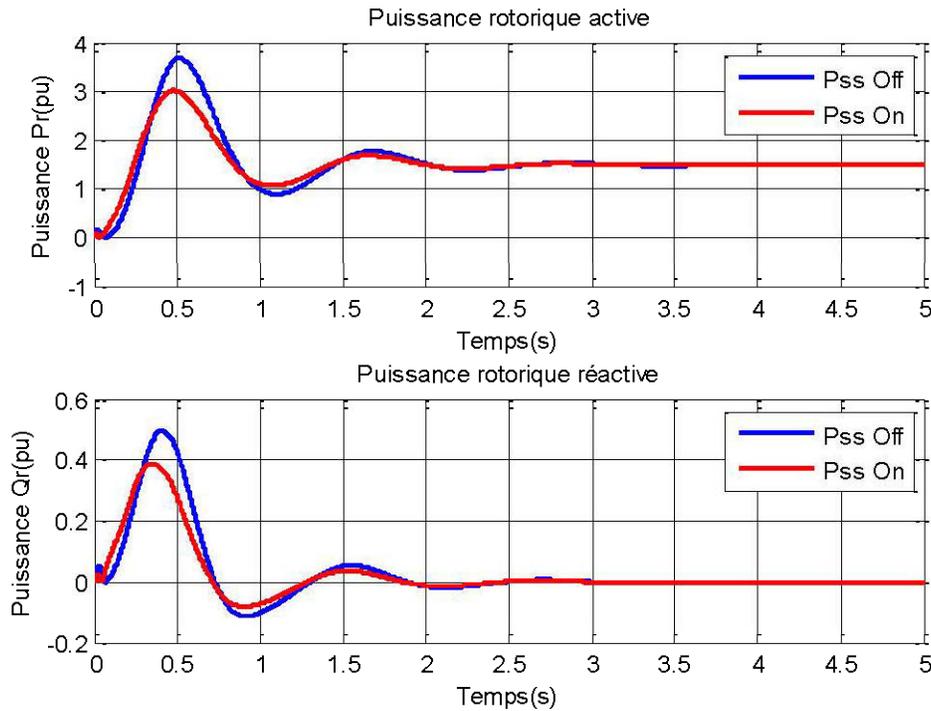


Figure 6-24 Variation des puissances au niveau du rotor avec et sans PSS

ZOOM :

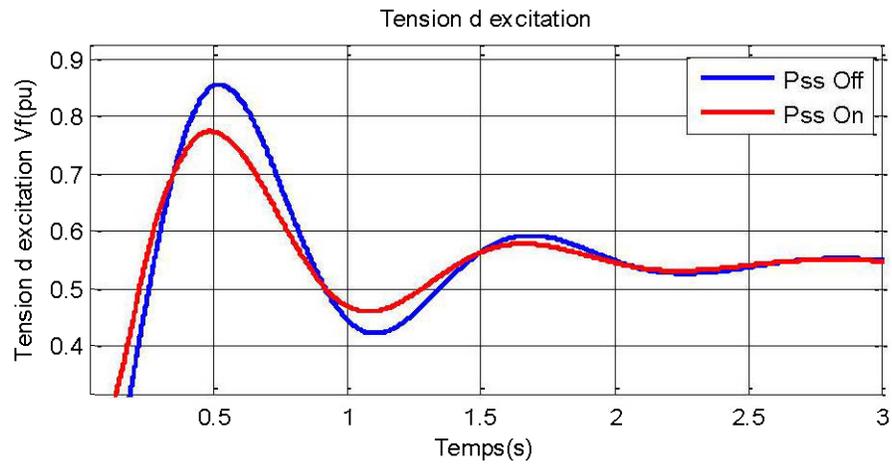


Figure 6-25 Tension V_{FD}

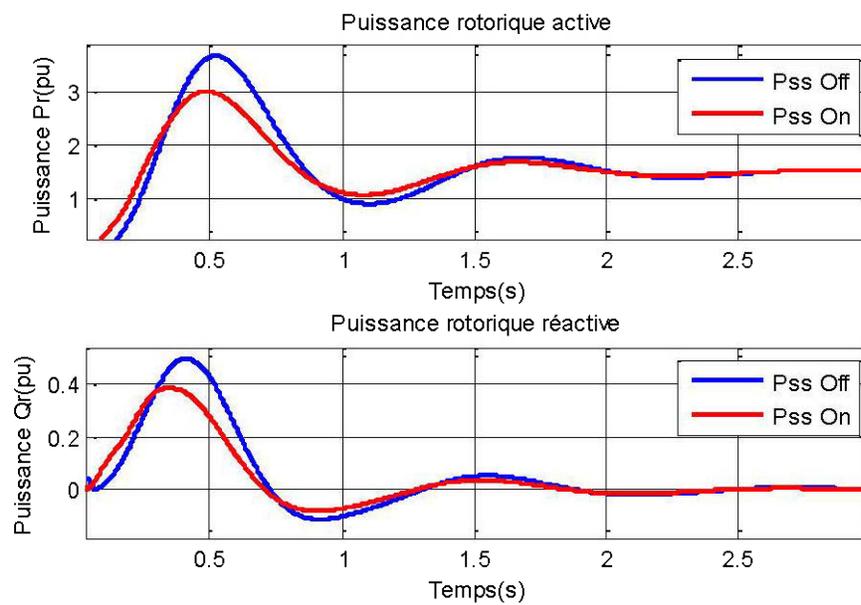


Figure 6-26 Puissances au rotor

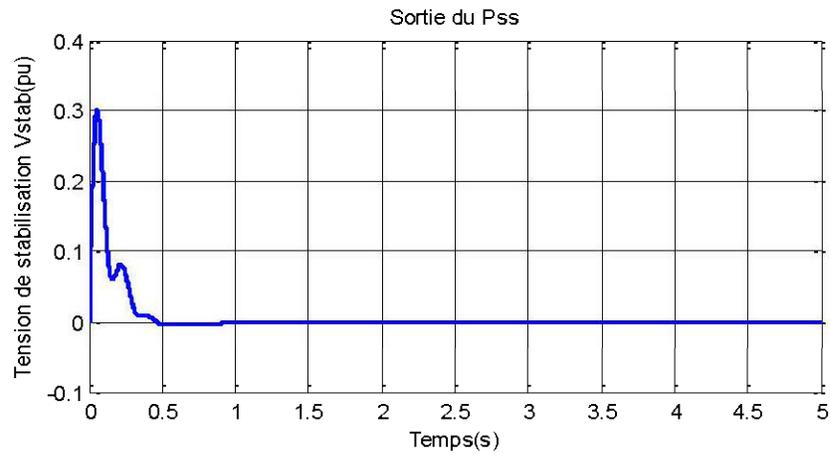


Figure 6-27 Tension de stabilisation V_{Stab}

✓ Remarques :

- Le stabilisateur de puissance PSS permet de réduire les oscillations au niveau des puissances (Figure 6-24, 6-26), tel qu'une baisse d'amplitude et gain en rapidité au niveau de la tension d'excitation (Figure 6-23, 6-25).
- Le PSS améliore aussi la stabilité et la rapidité du système (6-27), grâce à la tension de stabilisation V_{Stab} qui intervient pour réduire les oscillations plus rapidement.

6.9 Optimisation des paramètres du système d'excitation

✓ Optimisation par Algorithme Génétique [26]:

Afin d'optimiser les différents paramètres du système d'excitation statique type ST utilisé dans notre travail, nous adoptons l'algorithme génétique connu pour sa précision et sa robustesse dans ce type d'optimisation.

Après l'initialisation des paramètres de l'excitatrice (paramètres du régulateur automatique de tension AVR, paramètres du PID), dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système, on applique l'indice d'optimisation ITSE (*Integral Time Square Error*) défini par la fonction objectif f à minimiser, écrite comme suit :

$$f = \int_0^{+\infty} te^2(t) dt$$

Où le carré de l'erreur de tension $e(t)$ est intégré.

Application des opérateurs de sélection, croisement et mutation de l'algorithme génétique dans matlab toolbox : [26] [35]

- Sélection des paramètres : permet de spécifier le choix de sélection des parents pour la nouvelle génération dans l'algorithme génétique (SelectionFcn). Dans notre travail la méthode de sélection stochastique a été utilisée (@selectionstochunif).
- Croisement des paramètres : démontre la combinaison de deux individus parents pour former les individus enfants pour la nouvelle génération dans

l'algorithme génétique (CrossoverFcn). Le type de croisement utilisé est le cas uniforme (@crossoverScattered).

- Mutation des paramètres : spécifie le changement aléatoire du chromosome d'un individu dans une population pour former l'individu enfant muté de la nouvelle génération (MutationFcn). La mutation gaussienne est appliquée dans notre validation (@mutationGaussian).

Les résultats obtenus après l'application de la méthode d'optimisation par algorithme génétique sont donnés dans les tableaux et les figures ci-après.

6.9.1 Optimisation des paramètres de l'AVR

Paramètres du régulateur AVR	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Valeurs optimales (Algo Génétique)
K_A	10	400	10
T_A	0.01	0.1	0.1
K_F	0.02	0.1	0.02
T_F	0.3	1.5	1.5

Tableau 4 : paramètres du régulateur automatique de tension AVR

Affichage des résultats :

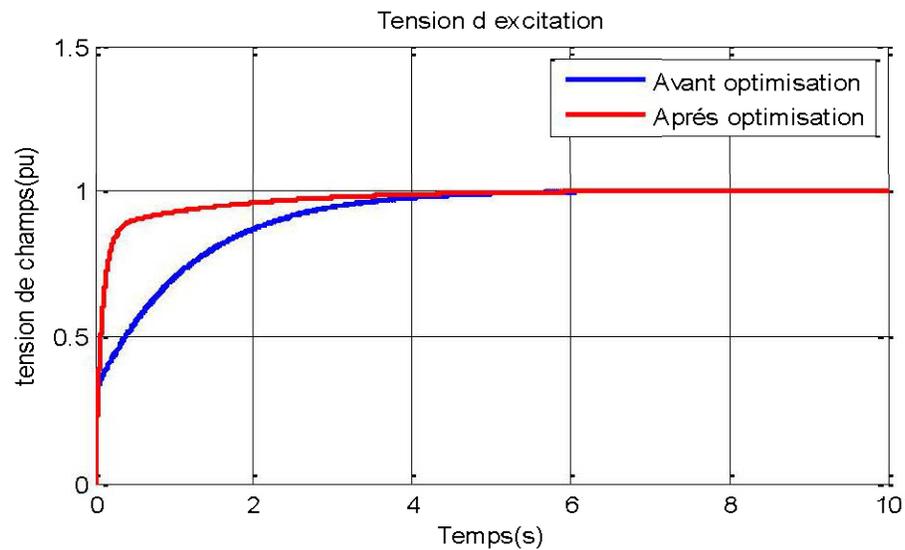


Figure 6-28 Tension d'excitation V_{FD} - avant et après optimisation

6.9.2 Optimisation des paramètres du régulateur PID

Paramètres du régulateur PID	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Valeurs optimales (Algo Génétique)
K_P	0	100	1,0844
K_I	0	100	3,5137
K_D	0	100	0,0476

Tableau 5 : paramètres du régulateur PID

Résultats obtenus :

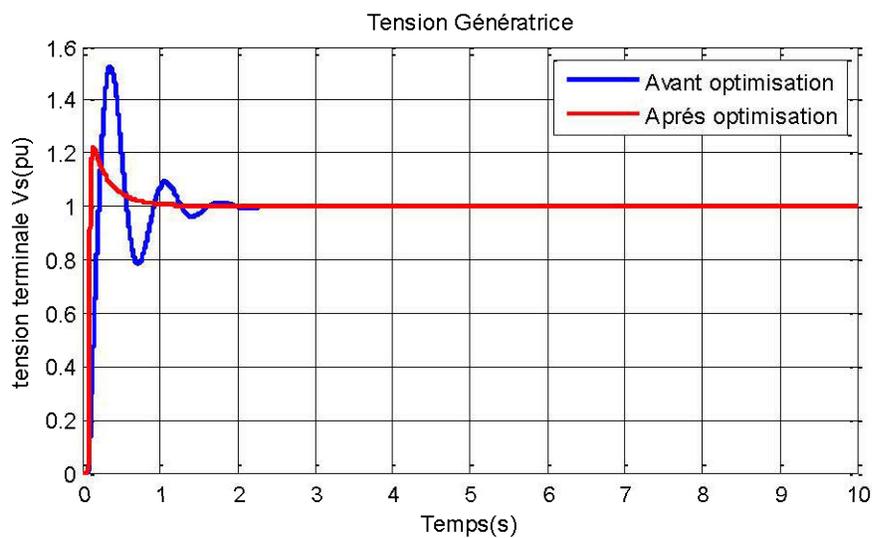


Figure 6-29 Tension V_s – avant et après optimisation

✓ Discussion :

- Les Figures 6-28 et 6-29 montrent clairement l'efficacité de l'optimisation par Algorithme Génétique (AG), tel qu'on obtient de meilleurs résultats en performance; rapidité de réponse (court temps de réponse), système stable (élimination des dépassements), parfaite précision (suivi adéquat de consigne).

6.9.3 Tests et Simulation sur le système global après optimisation

Régulateur automatique de tension (AVR)	$K_A = 10$	$K_f = 0,02$	$K_E = 1$	$T_b = 1$
	$T_A = 0,1$	$T_f = 1,5$	$T_E = 0$	$T_c = 1$
Régulateur classique PID	$K_p = 1.0844$	$K_I = 3,5137$	$K_d = 0,0476$	-
Limitation des tensions	$V_{Amax} = 300$	$V_{Amin} = -300$	$V_{Rmax} = 6,4$	$V_{Rmin} = -6,4$
Limitation des courants	$V_{Imax} = 4,4$	$V_{Imin} = -4,4$	-	-
Rectification	$K_C = 0.04$	$K_{LR} = 1$	-	-

Tableau 6 : paramètres optimaux du système d'excitation ST1

En utilisant les paramètres optimaux du système d'excitation statique type ST1 IEEE obtenus par optimisation par AG (tableau 6), on a effectué quelques simulations sur le modèle global implémenté dans matlab simulink.

6.9.3.1 Réponse à un échelon unitaire

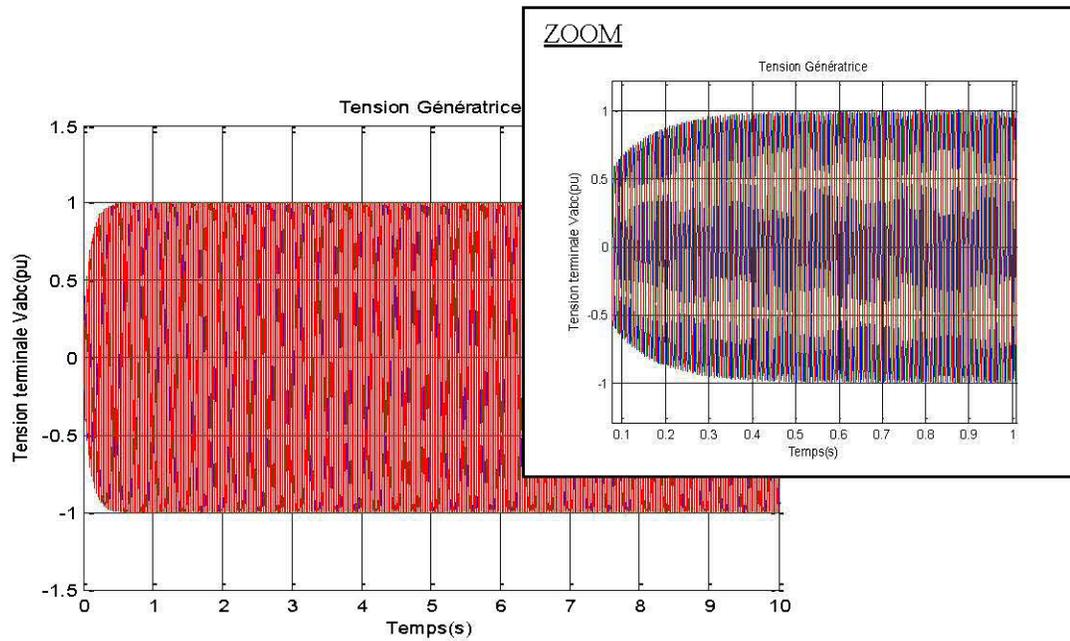


Figure 6-30 Tension génératrice V_{Sabc} (après optimisation)

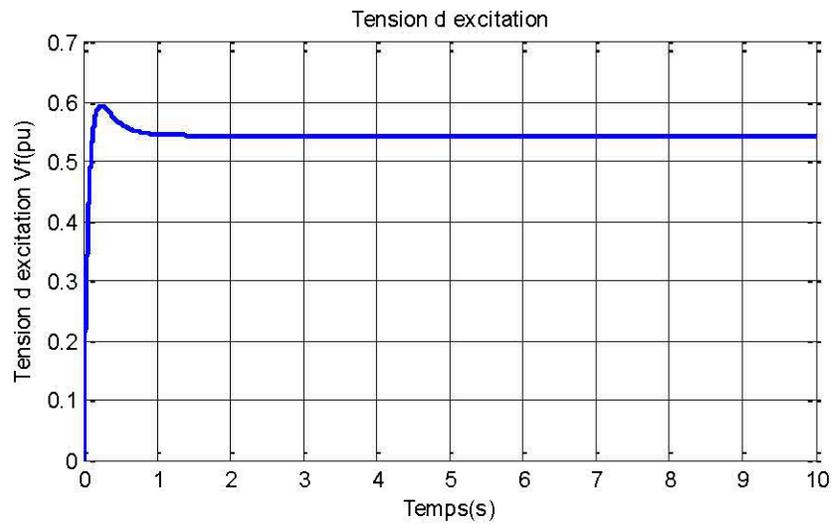


Figure 6-31 Tension d'excitation V_{FD} associée (après optimisation)

✓ Affichage des puissances :

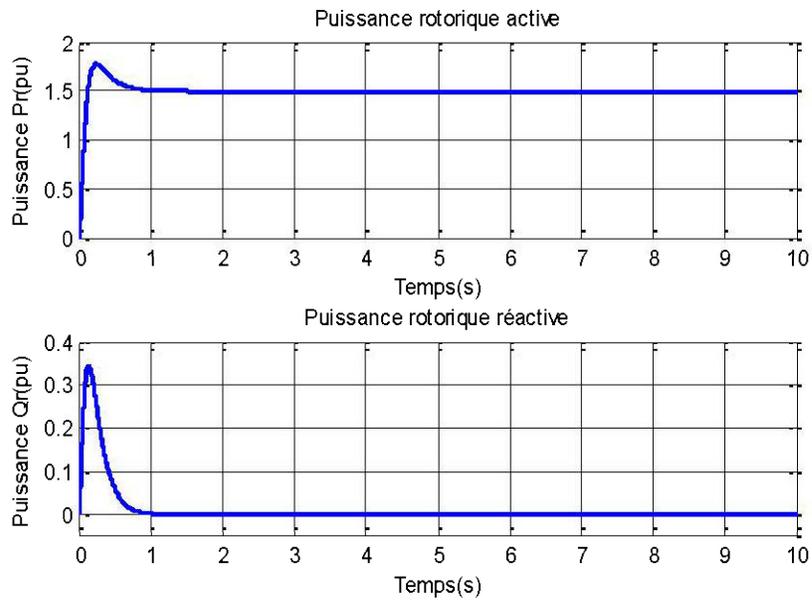


Figure 6-32 Variation des puissances au rotor

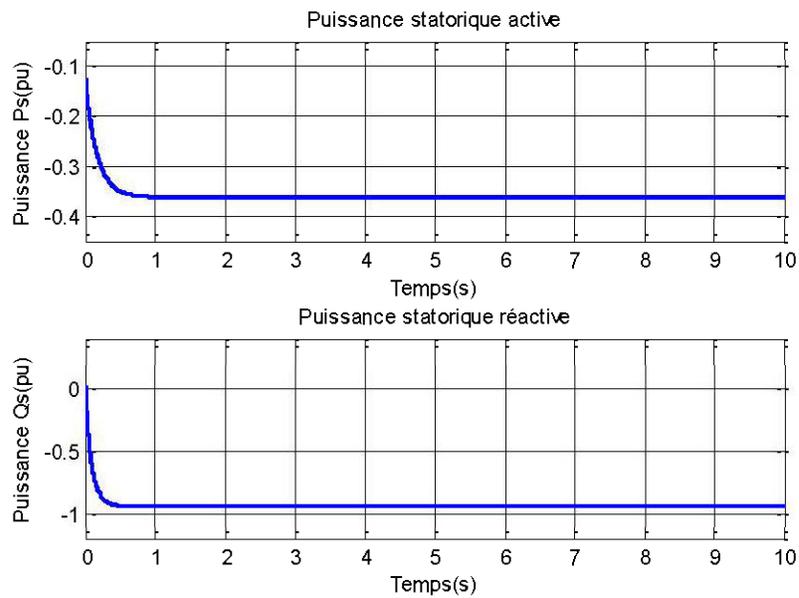


Figure 6-33 Puissances au stator

6.9.3.2 Réponse à une variation de tension

Afin de démontrer la variation de la tension génératrice ainsi que sa tension d'excitation correspondante après l'optimisation des paramètres de l'excitatrice par AG, un test réponse à un saut de tension est effectué. Les puissances relatives sont aussi visualisées.

- Augmentation de tension (échelon croissant de 0.5 pu à 1 pu, à $t=0.5s$)

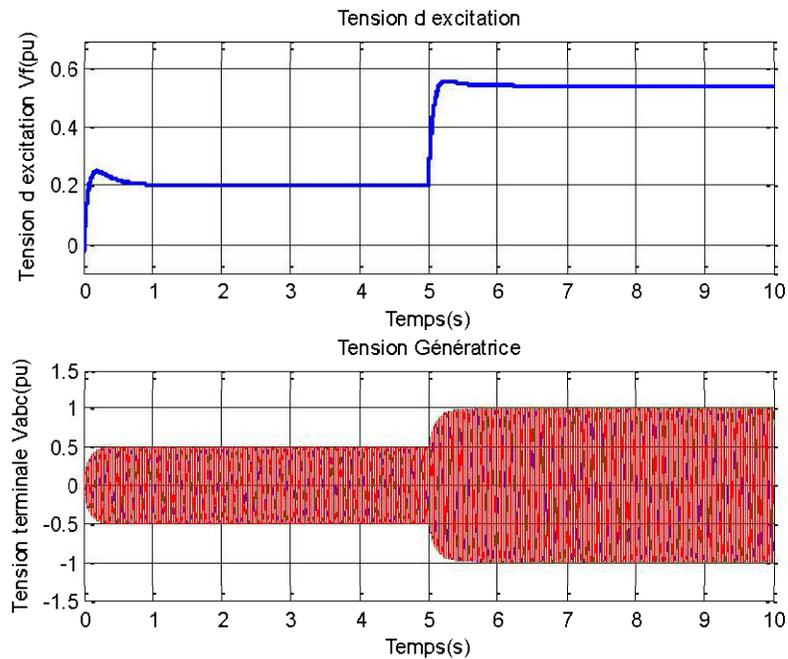


Figure 6-34 Tension d'excitation V_{FD} et Tension génératrice V_{Sabc}

✓ Affichage des puissances associées :

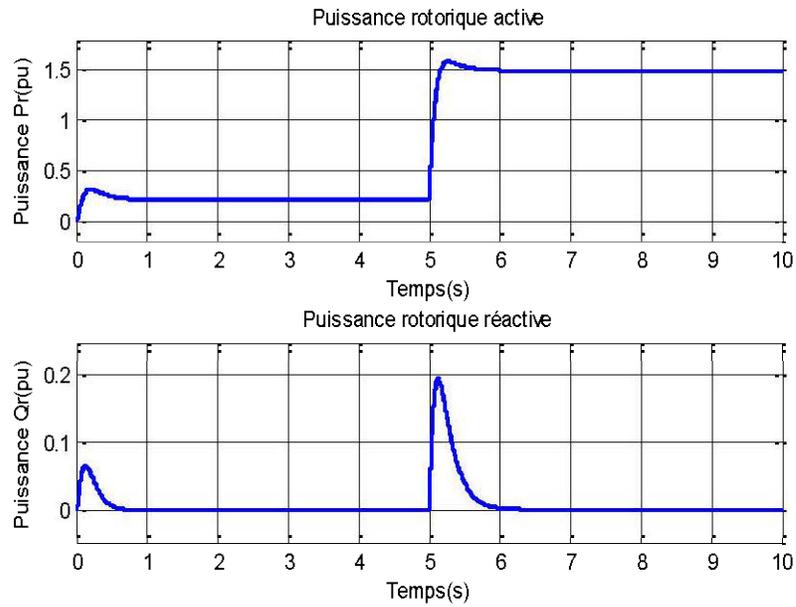


Figure 6-35 Variation des puissances au rotor

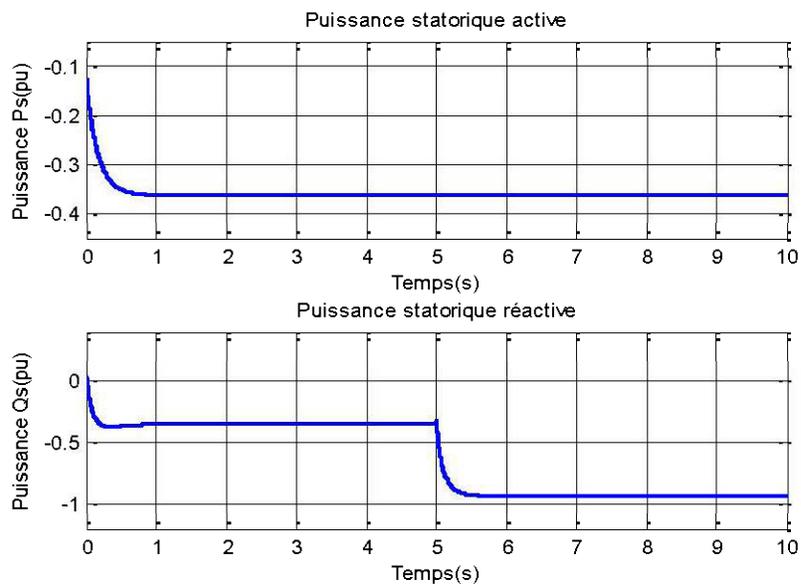


Figure 6-36 Variation des puissances au stator

✓ Remarques et discussions des résultats :

La réponse optimale obtenue en utilisant les AG est très satisfaisante, en comparant les résultats obtenus avant et après l'optimisation, dans tous les résultats de régulation de la tension génératrice V_{Sabc} et la tension d'excitation V_{FD} associée sur les Figures (6-7 et 6-8 / 6-30 et 6-31), on déduit :

- Plus de rapidité (temps de réponse moindre) après l'optimisation.
- Parfaite précision dans les réponses de V_{Sabc} et V_{FD} observées sur les Figures (6-30 à 6-32).
- Les résultats obtenus, après optimisation par AG montrent une stabilité meilleure (élimination de dépassement).

6.10 Conclusion

Ce chapitre illustre les résultats essentiels obtenus pour la validation de chaque partie du travail visé; citant principalement la régulation et l'optimisation par algorithme génétique des paramètres de l'excitatrice après adoption du modèle statique (ST). Nous pouvons alors, confirmer l'efficacité et la fiabilité de la méthode d'optimisation par AG dans l'amélioration des performances dynamiques du système.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet d'étude vise particulièrement un élément primordial dans le bon fonctionnement du simulateur analogique du groupe turbine-alternateur, que la compagnie Hydro-Québec prévoit de construire, mais aussi un élément crucial dans une centrale hydroélectrique en général. Le système d'excitation opère un rôle très important dans un groupe-turbine-alternateur, entre assurance de la protection des éléments du groupe et amélioration des performances dynamiques de l'ensemble. Notre travail a visé cet important élément, traitant alors sa modélisation, et l'optimisation de chaque paramètre qui intervient à ce niveau.

En premier lieu, nous avons abordé les motivations de ce travail d'un point de vue socio-économique et éducatif tout en justifiant les objectifs et l'importance d'une étude portée sur le système d'excitation dédié au simulateur analogique du groupe-turbine-alternateur d'Hydro-Québec. Au second chapitre, l'état de l'art sur les systèmes d'excitations des génératrices synchrones est présenté, introduisant alors les différents éléments constitutifs d'un système d'excitation, ainsi que les différents types d'excitatrices pouvant intervenir dans un groupe turbine-alternateur. Le chapitre 3 de ce document, établit la partie modélisation de chaque bloc du simulateur analogique, à savoir la génératrice synchrone, la turbine hydraulique et le système d'excitation, le type et le modèle de ce dernier est élaboré par deux méthodes, avant de faire une introduction aux régulateurs conventionnels qui interviennent au niveau de l'excitatrice statique de type ST, le fonctionnement de chaque partie de la régulation est alors explicité dans le chapitre 4. En vue d'améliorer, ajuster et de perfectionner les performances dynamique du système global défini après assemblage des modèle des sous-ensembles du groupe turbine-alternateur, une méthode

d'optimisation des paramètres du système d'excitation est choisie et présentée dans le chapitre 5, cette méthode est basée sur les algorithmes génétiques (AG) appartenant à la famille des algorithmes évolutionnistes qui sont de plus en plus utilisés de nos jours dans divers domaines d'étude. L'adoption des AG à notre travail dans le but d'optimiser les paramètres du système d'excitation de type statique ST du simulateur analogique nous a permis de valider et d'atteindre les objectifs de notre travail.

Dans ce travail, plusieurs défis et objectifs ont été relevés, qui sont énumérés comme suit :

- Établissement d'un modèle d'état du système d'excitation statique par la méthode DQ.
- Développement du modèle d'état de l'excitatrice statique par méthode DQ avec régulation de la tension d'excitation (chapitre 4).
- Développement du modèle du système d'excitation statique de type ST1 avec tous ses éléments, se basant au modèle de référence établi sur IEEE ST1A.
- Élaboration d'un modèle mathématique hybride des machines synchrones à pôles saillants.
- Application d'un travail de régulation de la tension par un régulateur automatique AVR, au niveau du système d'excitation statique ST.
- Application d'un stabilisateur de puissance PSS au niveau de l'excitatrice statique ST en vue d'élimination des oscillations de puissances.
- Mise en point d'un modèle global qui assemble les trois principaux modèles des blocs essentiels du groupe turbine-alternateur sous forme de blocs simulink.
- Optimisation des différents paramètres du système d'excitation de type statique en utilisant la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques.

Le travail sur les systèmes d'excitations en général, implique encore plus de recherche dans le domaine de la production d'énergie hydroélectrique, vue son immense importance dans l'ensemble des composantes des centrales hydroélectriques. Notre travail en particulier, effectué sur l'excitatrice du simulateur analogique prévu chez Hydro-Québec présente une sérieuse perspective et un grand acquis en vue de la conception expérimentale de cet élément.

Références

- [1] P.Kundur. *“Power System Stability and Control”*, New York : McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] Wei, and Zheng Xu, Member, IEEE, *“Excitation System Parameters Setting for Power System Planning”*. Power Engineering Society Summer Meeting IEEE 2002.
- [3] Mm.Gérard Cornu, Jean-Luc Fichet, Hervé Maurey et Rémy Pointereau. *“Rapport d'information n° 463 (2013-2014)”*, fait au nom de la commission du développement durable, Sénat le 16 avril 2014.
- [4] Hydro-Quebec en bref, octobre 2014, (<http://www.hydroquebec.com/a-propos-hydro-quebec/qui-sommes-nous/hydro-quebec-bref.html>)
- [5] Working Group on Prime and Energy Supply *“Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies”*. 1992 IEEE tram. Power System.
- [6] Hajagos, L.M.; Basler, M.J. *“Recommended practice for excitation system models for power system stability studies”*. Changes to IEEE 421.5 Power Engineering Society General Meeting 2005 IEEE.
- [7] Dr.Dhiya Ali Al-Nimma, Dr. Majid Salim Matti, *“Reactive Power Control of an Alternator with Static Excitation System Connected to a Network”*, Mosul University, Vol.18, N°3, June 2010.
- [8] M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, *“A Generator Transfer Function Regulator for Improved Excitation Control”*, IEEE Trans on. Power Systems, Vol.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.
- [9] P.M.Anderson, A.A Fouad. *“Power System Control and Stability”*, IEEE Press, 2003.
- [10] Prepared by the IEEE Working Group on Computer Modelling of Excitation Systems.*“Excitation system models for power system stability studies”*, IEEE committee report, February 1981.
- [11] Vladimir Chuvychin, Roman Petrichenko, Nikolay Gurov.*“ Optimization of Excitation System Parameters for Kegums Hydro Power Plant of Latvia”*.

- Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011, 10th International Conference on.
- [12] Q.Zhao.J.Jiang, “*Robust Controller Design for Generator Excitation Systems*”, IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.10, N^o 2, June 1995, pp.201-207.
- [13] Technical Report IEC International Electrotechnical Commission, ref.34-16-2, “*Excitation systems for synchronous machines*”. First edition 1991-02.
- [14] N.Srikanth (M.Tech), Atejasri-M.Tech Dept of IEEE, GIET, Rajahmundry, A.P-India, “*Enhancing power system stability by using thyristor controlled series compensator*”, Vol.2, Issue 5, September-October 2012, pp 1817-18-24.
- [15] Bhumaiiah Jula, M.Tech, Md.ASIF Assoc. Prof, Krishna Enugala, M.Tech. “*Simulation for protection of Huge Hydro Generator from Short Circuit Faults*”, Vol.4, November 2012.
- [16] J.Machowski and S.Robak, J.W.Bialek, J.R.Bumby, “*Excitation control for use with synchronous generators*”. IEE Proc-Gener. Trans.distrib, Vol.145, N^o 5 september 1998.
- [17] C.H.Cheng, Y.Y.Hsu, “*Damping of Generator Oscillation Using an Adaptative Static Var Compensateur*”, IEEE Trans on. PowerSystems, Vol.7, no.2, May 1992, pp.718-724.
- [18] F. Rotella, “*Commande des systèmes linéaires à plusieurs entrées*”. Notes de cours, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tarbes, 2002, rotella@enit.fr.
- [19] K.Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand. “*Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ Method*”, 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering.
- [20] Koson.Chaijarumudomrung, Kongpan.Areerak, and Kongpo.Areerak. School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand. “*The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier using an Artificial Intelligence Technique*” European Journal of Scientific Research ISSN 2011.
- [21] Koson.Chaijarumudomrung, Kongpan.Areerak and Kongpo.Areerak School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand. “*The Stability Study of AC-DC Power System with*

Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control” European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216x vol.62 no.4 (2011).

- [22] Vadim Slenduhhov, Jako Kilter Tallinn University of Technology (Estonia) v.slenduhhov@gmail.com, jako.kilter@ttu.ee “*Modeling and Analysis of the Synchronous Generators Excitation Systems*”, parnu 2013, p 252-257.
- [23] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA. Copyright © 1992. “*IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*”.
- [24] T.Zabaiou, Member IEEE, Louis-A Dessaint, senior member IEEE, Patrice Brunelle. “*Development of new library of IEEE Excitation system and its validation with PSS/E*”. 2012 IEEE.
- [25] Anant Oonsivilai and Padej Pao-La-Or. “*Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System*”. Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol.3, june 2008.
- [26] Cao Yuan, Ma Jin, “*Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System*”, Critical infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference. 20-22 Sept. 2010.
- [27] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies “*Hydraulic Turbine and turbine control models for system dynamic studies*”, Transactions on Power Systems, vol.7, no.1, February 1992.
- [28] Meng Shen, Student Member, IEEE, Vaithianathan Venkatasubramanian, Member, IEEE, Nicholas Abi-Samra, and Dejan Sobajic, “*A New Framework for Estimation of Generator Dynamic Parameters*”. IEEE transactions on power systems, vol.15, no.2, may 2000.
- [29] E.Lutton, “*Darwinisme artificiel*”, INRIA Rocquencourt Equipe Complex Projet Fractales, 2004.
- [30] J.Philippe Rennard, “*Genetic Algorithm Viewer: Démonstration d'un algorithme génétique*”, www.rennad.org/alif, Avril 2000.
- [31] D.E. Goldberg, “*Genetic algorithms in search, optimisation, and machine learning*”. London : Addison-Wesley, 1989.

- [32] L.Davis, *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold : New York, 1991.
- [33] Z.Michalewicz, *Genetic Algorithms*. Springer-Verlag : New York, 1992.
- [34] Sidhartha Panda, N. P. Padhy, “*Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for TCSC-based Controller Design*”. World Academy of Science, Engineering and Technology 3 2007.
- [35] A.J.Chipperfield and P.J.Fleming. “*The matlab genetic algorithm toolbox*”. Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield. From IEE colloquium on applied control techniques using MATLAB, Digest no.1995/014.

Annexe 1

Conversion des grandeurs en (pu)

$$\text{valeur de la grandeur en pu} = \frac{\text{valeur de la grandeur actuelle}}{\text{valeur de la base de la grandeur}}$$

	Stator	Circuit de champ	Unité
Tension	$U_{sréf} = \sqrt{2}V_N$	$U_{fréf} = \frac{S_{sréf}}{I_{fréf}}$	[V]
Courant	$I_{sréf} = \sqrt{2}I_N$	$I_{fréf}$	[A]
Puissance	$S_{sréf} = \frac{3}{2}U_{réf}I_{réf} = 3V_N I_N$		[VA]
Impédance	$Z_{sréf} = \frac{U_{sréf}}{I_{sréf}}$	$Z_{fréf} = \frac{U_{fréf}}{I_{fréf}} = \frac{S_s}{I^2}$	[Ω]
Inductance	$L_{sréf} = \frac{Z_{sréf}}{\omega_{réf}}$	$L_{fréf} = \frac{Z_{fréf}}{\omega_{réf}}$	[H]
Flux	$\psi_{sréf} = L_{sréf}I_{sréf} = \frac{U_{sréf}}{\omega_{réf}}$		[Wb]

Annexe 2

✓ Linéarisation autour d'un point de fonctionnement ou d'équilibre :

Soit une fonction $y = f(x, z)$ non linéaire, définie autour du point d'équilibre par $y_e = f(x_e, z_e)$

On a la série de Taylor :

$$y = f(x_e, z_e) + \left[\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right]_{x_e, z_e} (x - x_e) + \left[\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right]_{x_e, z_e} (z - z_e) + \dots$$

Tronquée après les termes du premier ordre;

$$\begin{cases} \delta y = y - y_e \\ \delta x = x - x_e \\ \delta z = z - z_e \end{cases}$$

La loi linéarisée est alors définie par :

$$\delta y = \left[\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right]_{x_e, z_e} \delta x + \left[\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right]_{x_e, z_e} \delta z$$

1) Le modèle linéaire de la turbine hydraulique dans le chapitre 3 est obtenu selon cette méthode, voici dessous, le développement des équations :

A partir du modèle non linéaire suivant (3.35) :

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} \left(1 - \frac{q^2}{A_t^2 g^2} \right) \\ P_m = \frac{q^3}{A_t^2 g^2} \end{cases}$$

Selon le développement de Taylor;

On aura les deux fonctions:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = f_1(q, g) \\ P_M = f_2(q, g) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = f_1(q_0, g_0) + \left[\frac{\partial f_1(q, g)}{\partial q} \right]_{q_0, g_0} (q - q_0) + \left[\frac{\partial f_1(q, g)}{\partial g} \right]_{q_0, g_0} (g - g_0) \\ P_M = f_2(q_0, g_0) + \left[\frac{\partial f_2(q, g)}{\partial q} \right]_{q_0, g_0} (q - q_0) + \left[\frac{\partial f_2(q, g)}{\partial g} \right]_{q_0, g_0} (g - g_0) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = 0 - \frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \\ P_M = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2} + \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \end{cases}$$

(En régime stationnaire (q_0, g_0) , la fonction $\frac{dq}{dt}$ est nulle), on obtient enfin :

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \\ P_M = P_0 + \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \end{cases} \quad \text{Avec } P_0 = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2}$$

2) Obtention du système linéarisé du modèle DQ du convertisseur statique (chapitre 3) :

Soit, en général, un système non linéaire défini par les fonctions d'état et de sortie suivantes :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ \dot{X}_n = f_n(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ Y_1 = g_1(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ Y_p = g_p(X_1(t), \dots, X_n(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t), U(t)) \\ Y(t) = g(X(t), U(t)) \end{cases}$$

La linéarisation du modèle d'état autour du point d'équilibre (X_0, U_0) est développée selon Taylor au 1^{er} ordre des fonctions f et g :

- Équations d'état

$$\begin{cases} \dot{X}_1 \approx f_1(X_0, U_0) + \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \\ \vdots \\ \dot{X}_n \approx f_n(X_0, U_0) + \frac{\partial f_n}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial f_n}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \end{cases}$$

- Équations de sortie

$$\begin{cases} Y_1 \approx g_1(X_0, U_0) + \frac{\partial g_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial g_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \\ \vdots \\ Y_p \approx g_p(X_0, U_0) + \frac{\partial g_p}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial g_p}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \end{cases}$$

En utilisant les relations suivantes :

$$\begin{cases} \delta X = X - X_0 \\ \delta U = U - U_0 \\ \delta Y = Y - Y_0 \end{cases}$$

Les équations peuvent alors s'écrire :

- Équations d'états

$$\begin{cases} \delta \dot{X}_1 \approx f_1(X_0, U_0) + \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \\ \vdots \\ \delta \dot{X}_n \approx f_n(X_0, U_0) + \frac{\partial f_n}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial f_n}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \end{cases}$$

- Équations de sortie :

$$\begin{cases} \delta Y_1 \approx g_1(X_0, U_0) + \frac{\partial g_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial g_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \\ \vdots \\ \delta Y_p \approx g_p(X_0, U_0) + \frac{\partial g_p}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial g_p}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \end{cases}$$

La forme matricielle est :

$$\begin{cases} \delta \dot{X}(t) = A(X_0, U_0) \delta X + B(X_0, U_0) \delta U \\ \delta Y(t) = C(X_0, U_0) \delta X + D(X_0, U_0) \delta U \end{cases}$$

Avec :

$$A(X_0, U_0) = \frac{\partial f}{\partial X^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{X_0, U_0} ; B(X_0, U_0) = \frac{\partial f}{\partial U^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{X_0, U_0}$$

$$C(X_0, U_0) = \frac{\partial g}{\partial X^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{X_0, U_0} ; D(X_0, U_0) = \frac{\partial g}{\partial U^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{X_0, U_0}$$

Annexe 3

Paramètres utilisés dans les simulations du modèle du convertisseur statique par la méthode DQ :

- Sans régulation de la tension V_f [19] :

$$\left[\begin{array}{llll} R_{eq} = 0.15\Omega; & L_{eq} = 30\mu H; & C_{eq} = 2nF; & \\ C_F = 1000\mu F; & r_F = 0.03\Omega; & L_F = 8mH; & \lambda = \pi / 3 \end{array} \right]$$

- Avec régulation de la sortie V_f [20] :

$$\left[\begin{array}{llll} R_{eq} = 0.15\Omega; & L_{eq} = 30\mu H; & C_{eq} = 2nF; & \\ C_F = 8000\mu F; & r_F = 0.03\Omega; & L_F = 8mH; & \lambda = \pi / 3 \end{array} \right]$$

Annexe 4

- Régulation de la vitesse de rotation: Exemple de calcul des paramètres du régulateur PID ;

- ✓ Méthode par compensation de pôles :

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

$$G_{BO}(s) = \frac{K_a}{T_a s} \cdot \frac{1}{s} \Rightarrow G_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_a} s} \quad \text{avec } T_a \approx 0$$

On déduit alors les paramètres du régulateur :

$$\begin{cases} T_i = \frac{1}{K_a} \Rightarrow K_i = K_a \\ T_d = T_a \Rightarrow K_d = T_a \\ K_p = \frac{1}{\tau_c \cdot K_a \cdot R_p} \end{cases} \quad \text{tel que } \tau_c : \text{ constante de temps}$$

- Régulation de la puissance mécanique :

A partir du modèle d'état de la turbine hydraulique équation (3.38)

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2}{T_w G_0} q + \frac{2A_t}{T_w G_0} g \\ \frac{dg}{dt} = -K_a g + K_a u \\ P_m = 3q - 2A_t g \end{cases} \quad (\text{a})$$

✓ méthode par retour d'état :

$$\text{A partir de la formulation d'un système d'état : } \begin{cases} \dot{p}(x) = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (\text{b})$$

Et par superpositions des deux systèmes (a) et (b), les matrices d'états sont :

$$A = -\frac{2}{T_w G_0}; \quad B = \frac{2A_t}{T_w G_0}; \quad C = 3 \quad \text{et} \quad D = 2A_t \quad \text{où la commande représente le}$$

vannage g , le débit q et la puissance mécanique P_m les états.

Le calcul de la matrice d'état K_{-c} se fait comme suite :

$$\text{La loi de commande : } u_c = -K_{-c}x + v(t)$$

$$\text{Polynôme caractéristique : } A + BK_{-c} = -\frac{2}{T_w G_0} + \frac{2A_t}{T_w G_0} K_{-c}$$

Prenant un pôle désiré $p = l$, on aura $P_d = S - 1$;

$$\text{Sachant que } P_{(A+BK_{-c})} = S + A + BK_{-c} = S - \frac{2}{T_w G_0} + \frac{2A_t}{T_w G_0} K_{-c}$$

$$\text{Pour } P_d = P_{(A+BK_{-c})} \Rightarrow -\frac{2}{T_w G_0} + \frac{2A_t}{T_w G_0} K_{-c} = -1$$

$$\Rightarrow K_{-c} = \frac{1}{A_t} \left(1 - \frac{T_w G_0}{2} \right)$$

Annexe 5

Code matlab du modèle par DQ du convertisseur statique non commandé

```
% Déclaration des équations:

function px = fcn(x, params, U)
%#enl
ids = x(1); iqs = x(2); vbusd = x(3); vbusq = x(4); idc = x(5);
vf = x(6);

pcpl = U(1); vsd = U(2); vsq = U(3);

Req = params(1); Leq = params(2); Ceq = params(3); rmu =
params(4);
rf = params(5); Lf = params(6); Cf = params(7); w = params(8);

px = zeros(6,1);

px(1) = -(Req/Leq)*ids + w*iqs - (1/Leq)*vbusd + (1/Leq)*vsd;
px(2) = -w*ids - (Req/Leq)*iqs - (1/Leq)*vbusq + (1/Leq)*vsq;
px(3) = (1/Ceq)*ids + w*vbusq - (3*sqrt(2)/(pi*Ceq))*idc;
px(4) = -w*vbusd + (1/Ceq)*iqs;
px(5) = (3*sqrt(2)/(pi*Lf))*vbusd - ((rf+rmu)/Lf)*idc -
(1/Lf)*vf;
px(6) = (1/Cf)*idc - (1/Cf)*(pcpl/vf);
```

```
% initialisation de l'espace de travail
clear all; close all;
clc
global params U

% paramètres de l'excitatrice :

% Données
f = 60;
Req = 0.15;
Leq = 30e-6 ;
Ceq = 2e-9;
w = 2*pi*f;
rmu = (3*w*Leq)/pi ;
rf = 0.03;
```

```
Lf = 8e-3;
Cf = 10000e-6;
landha0 = pi/3;
alpha0 = 15*pi/180;
params = [Req Leq Ceq rmu rf Lf Cf w];

Vs = 230;

Vm = sqrt(2)*Vs;
vsd = sqrt(3/2)*cos(landha0 + alpha0)*Vm;
vsq = sqrt(3/2)*sin(landha0 + alpha0)*Vm;

% conditions initiales :
X0 = [14.25 ; 0 ; 130.5; 374.2; 10.55; 180.55]; % système non
commandé

% Affichage des résultats :

plot(t,Vf,'lineWidth',2); hold on
grid on
xlabel('Temps(s)');
ylabel('Tension Vf');
title('Tension Excitatrice')
axis([0.4 0.9 110 150])

% ----- FIN -----%
```

Annexe 6

Code matlab du modèle par DQ du convertisseur statique avec régulation de l'excitation :

```
% Déclaration des équations:

function px = fcn(x, params, U, control)
%#enl

ids = x(1); iqs = x(2); vbusd = x(3); vbusq = x(4); idc = x(5);
vf = x(6);
Xv = x(7); Xi = x(8);

pcpl = U(1); vsd = U(2); vsq = U(3); vf_ref = U(4);

Req = params(1); Leq = params(2); Ceq = params(3); rmu =
params(4);
rf = params(5); Lf = params(6); Cf = params(7); w = params(8);

kpv = control(1); kpi = control(2); kiv = control(3); kii =
control(4);

px = zeros(8,1);

px(1) = -(Req/Leq)*ids + w*iqs - (1/Leq)*vbusd + (1/Leq)*vsd;
px(2) = -w*ids - (Req/Leq)*iqs - (1/Leq)*vbusq + (1/Leq)*vsq;
px(3) = (1/Ceq)*ids + w*vbusq - (3*sqrt(2)/(pi*Ceq))*idc;
px(4) = -w*vbusd + (1/Ceq)*iqs;
px(5) = - ((rf+kpi)/Lf)*idc + ((kiv*kpi)/Lf)*Xv + (kii/Lf)*Xi -
((kpv*kpi)/Lf)*vf + ((kpv*kpi)/Lf)*vf_ref;
px(6) = (1/Cf)*idc - (1/Cf)*(pcpl/f);
px(7) = -vf + vf_ref ;
px(8) = -idc - kpv* vf + kiv*Xv + kpv* vf_ref ;
```

```

% paramètres de convertisseur commandé :
% Données
f = 60; % fréquence
Req = 0.15;
Leq = 30e-6 ;
Ceq = 2e-9;
w = 2*pi*f; % pulsation propre
rmu = (3*w*Leq)/pi ; % résistance variable AC-DC
rf = 0.03;
Lf = 8e-3;
Cf = 8000e-6;
landha0 = pi/3; % Déphasage
alpha0 = pi/18; % angle d'amorçage des thyristors
params = [Req Leq Ceq rmu rf Lf Cf w];

% contrôleur PI :
vf_ref = 300;
e = 0.8;
wni = 2*pi*50;
wnv = 2*pi*30;

% contrôle de tension :
kpv = 2*e*wnv*Cf;
kiv = (wnv^2)*Cf;

% contrôle de courant ;
kpi = 2*e*wni*Lf - rf;
kii = (wni^2)*Lf;
control = [kpv kpi kiv kii];

Vs = 230;
Vm = sqrt(2)*Vs;
vsd = sqrt(3/2)*cos(landha0 + alpha0)*Vm;
vsq = sqrt(3/2)*sin(landha0 + alpha0)*Vm;

% conditions initiales :
X0 = [14.25 ; 0 ; 130.5; 374.2; 10.55; 300; 0.009; 2.7837e-4]; %
système commandé.

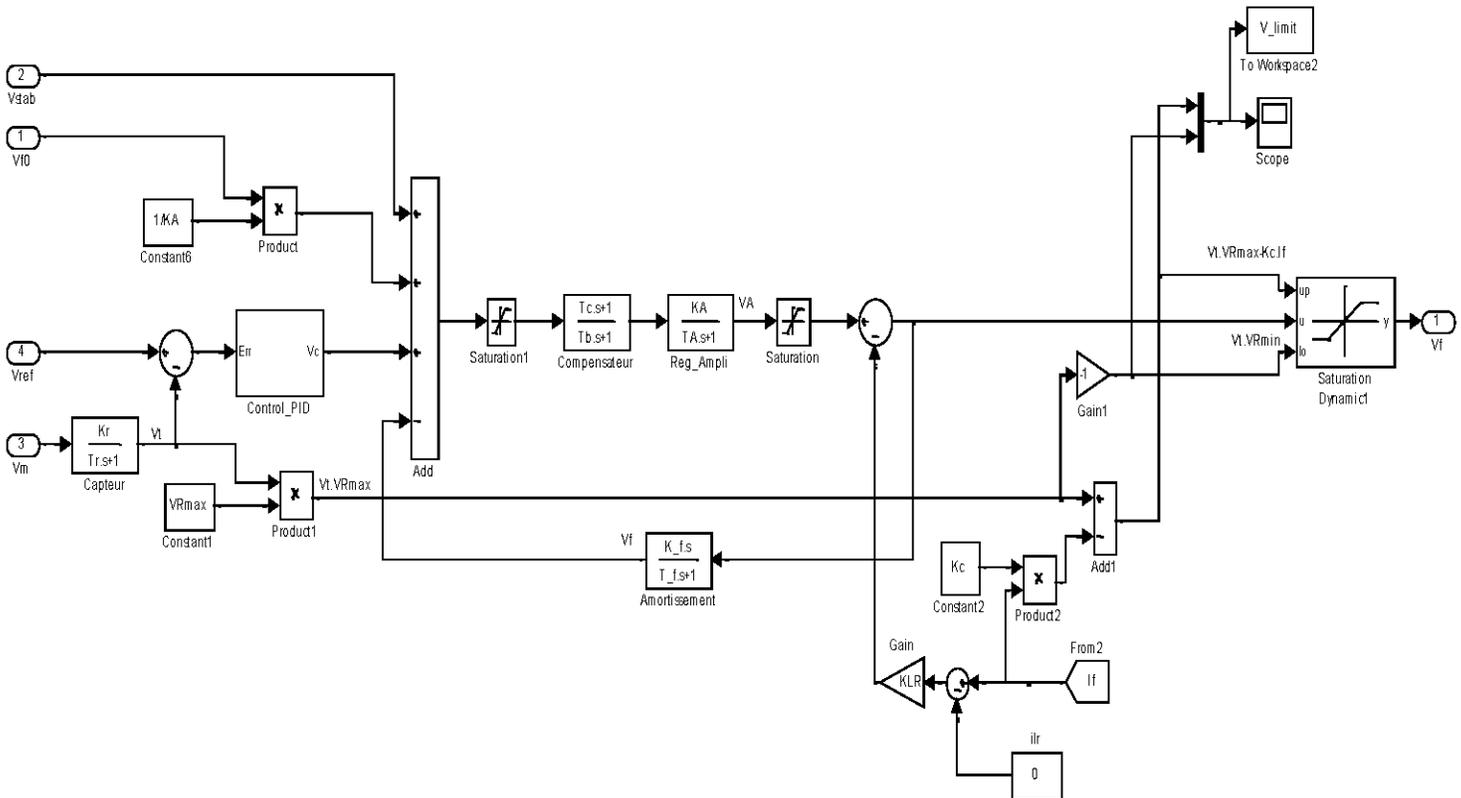
% Affichage des résultats :
plot(t,Vf,'lineWidth',2); hold on
grid on
xlabel('Temps(s)');
ylabel('Tension Vf(pu)');
title('Tension Excitatrice');
axis([0.1 0.5 296 302]);

% ----- FIN ----- %

```

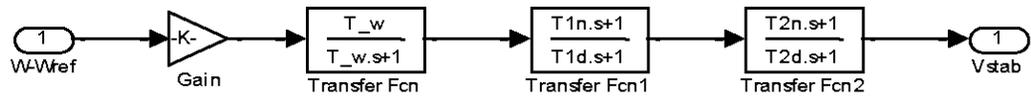
Annexe 7

Dessin simulink du système d'excitation type ST1- Régulateur de tension



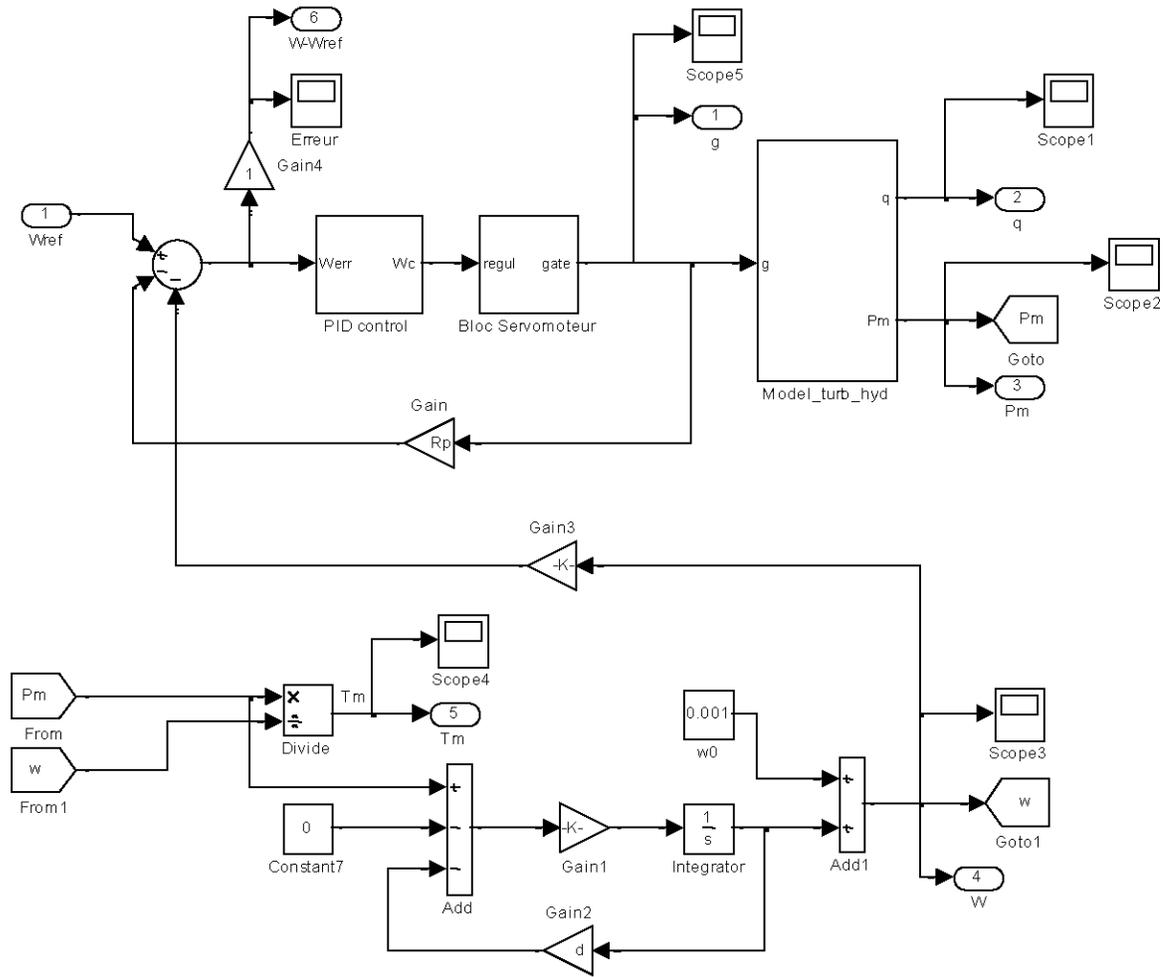
Annexe 8

Dessin simulink du Stabilisateur de puissance PSS1A



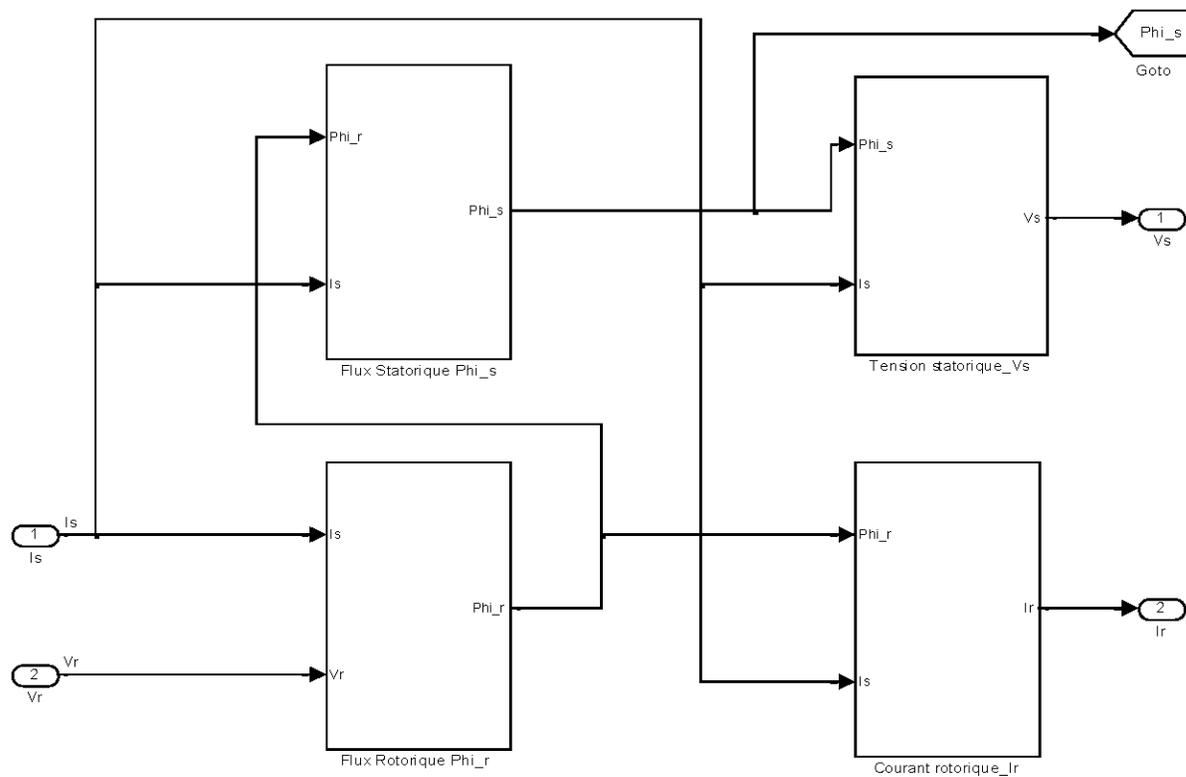
Annexe 9

Dessin simulink du régulateur de vitesse de la turbine hydraulique

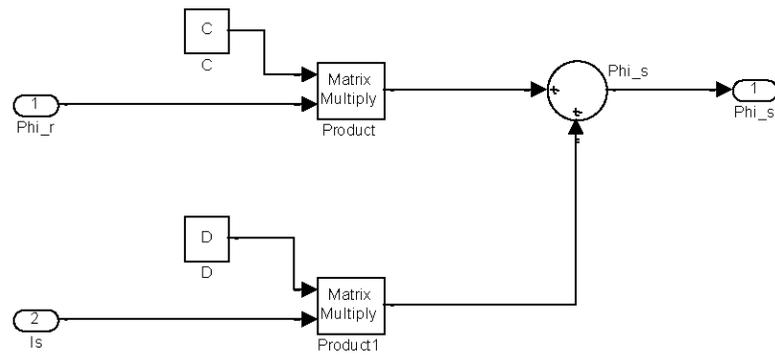


Annexe 10

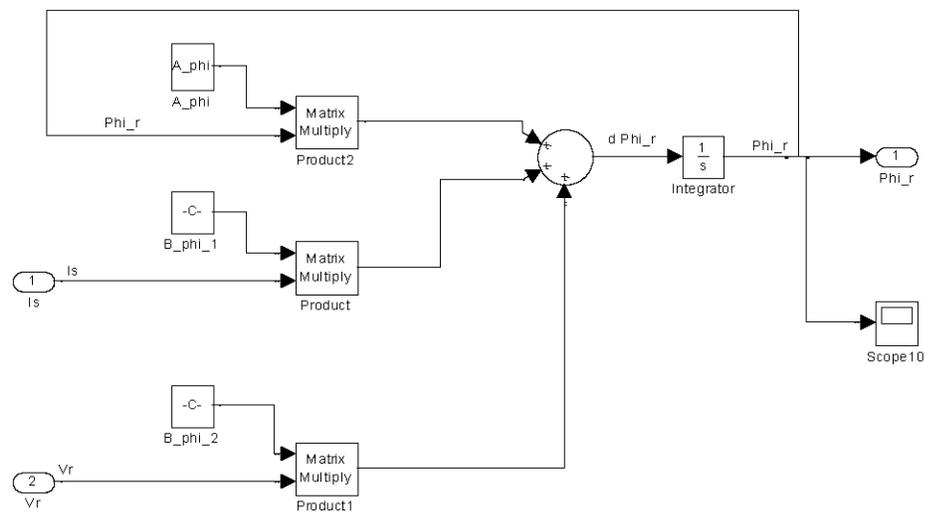
Dessin simulink du modèle hybride de la machine synchrone



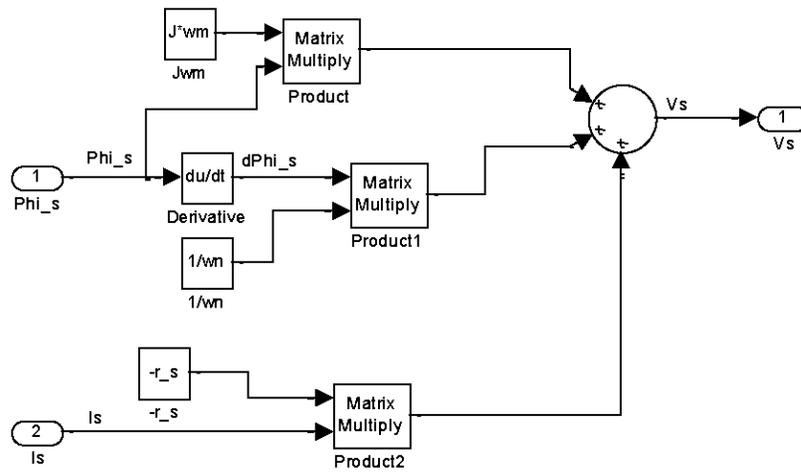
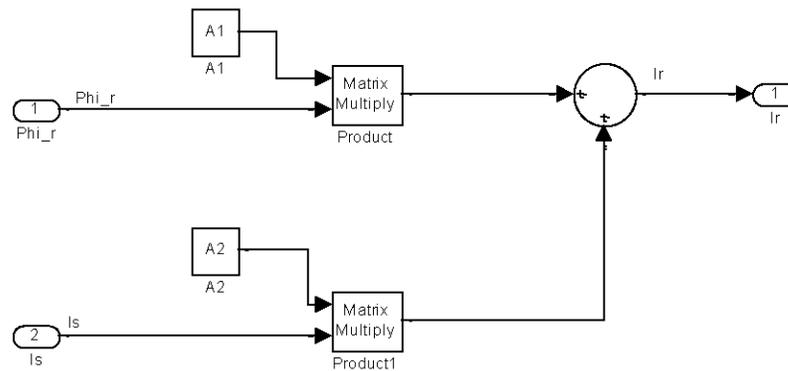
Présentation des blocs séparément :

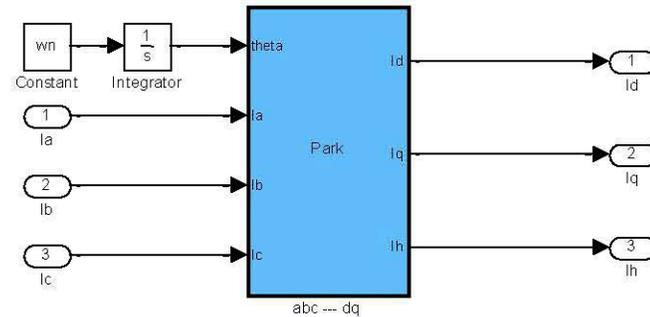


Calcul du flux statorique Φ_s



Calcul du flux rotorique Φ_r

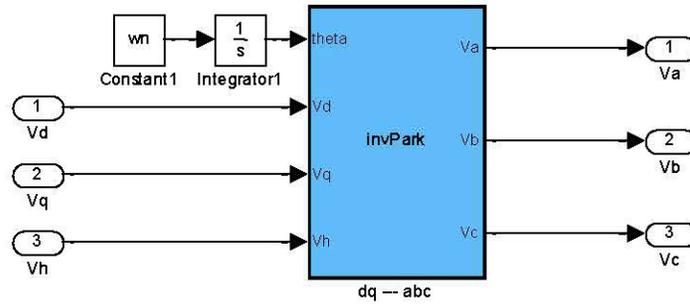
Calcul de la tension statorique V_s Calcul du courant rotorique I_r



```
function [Id, Iq, Ih] = Park(theta, Ia, Ib, Ic)
%#enl
P = (2/3)*[cos(theta), cos(theta-(2*pi)/3),
cos(theta+(2*pi)/3);...
-sin(theta), -sin(theta-(2*pi)/3), -
sin(theta+(2*pi)/3);...
0.5,0.5,0.5];

Id = P(1,:)*[Ia Ib Ic]';
Iq = P(2,:)*[Ia Ib Ic]';
Ih = P(3,:)*[Ia Ib Ic]';
end
```

Bloc transformée de park



```
function [Va,Vb,Vc] = invPark(theta,Vd,Vq,Vh)

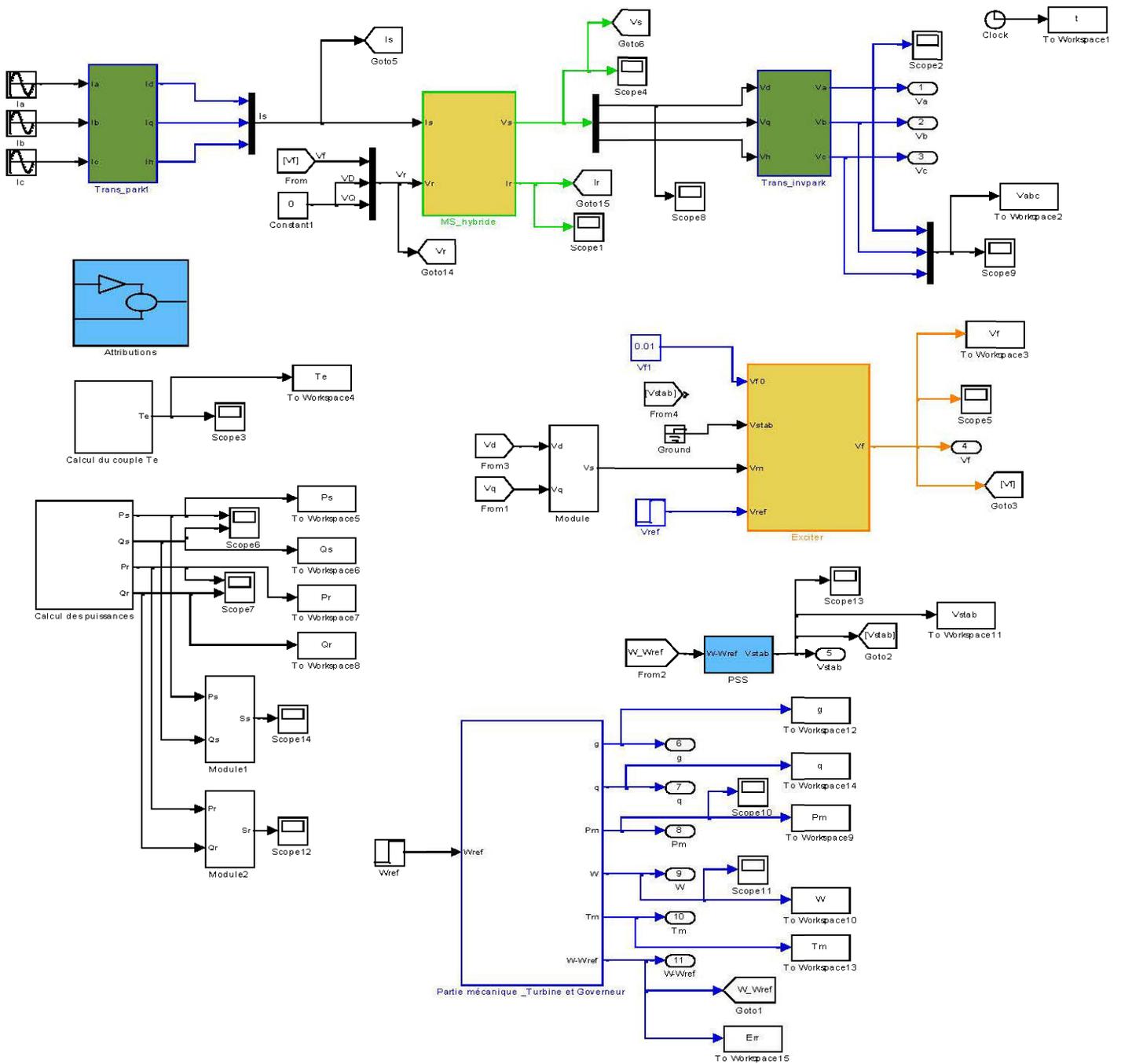
inv_P = [cos(theta), -sin(theta), 1;...
         cos(theta-(2*pi)/3), -sin(theta-(2*pi)/3), 1;...
         cos(theta+(2*pi)/3), -sin(theta+(2*pi)/3), 1];
Va = inv_P(1,:) * [Vd Vq Vh]';
Vb = inv_P(2,:) * [Vd Vq Vh]';
Vc = inv_P(3,:) * [Vd Vq Vh]';

end
```

Bloc transformée de Park inverse

Annexe 11

Dessin simulink du modèle global du groupe turbine-alternateur



Annexe 12

Scripte matlab.m du programme global

```

% initialisation de l'espace de travail
%=====

clear all; close all
clc

% Données -----

% Caractéristiques de base de la machine

S_base = 120;           % puissance de base (VA)
V_base = 208*sqrt(2);  % tension de base (V)
I_base = 0.33*sqrt(2); % courant de base (A)
Z_base = V_base/I_base; % impédance de base (Ohms)
f       = 60;          % fréquence de base (hertz)
wn      = 2*pi*f;      % pulsation électrique de base
p       = 2;           % Nombre de paires de pôle
N       = 60*f/p;      % vitesse de rotation
wm      = 1;           % vitesse de synchronisme

% Paramètres de la machine (en pu)

ra = 0.0198;           % résistance stratorique
rD  = 0.012;           % résistance de l'amortisseur D
rQ  = 0.0073;         % résistance de l'amortisseur Q
rh  = 1;%ra;           % résistance homopolaire
rf  = 0.1983;         % résistance de fuite
xa  = 0.0101;         % réactance stratorique
xD  = 0.669;          % réactance de l'amortisseur D
xQ  = 0.1352;         % réactance de l'amortisseur Q
xh  = 1;%xa;           % réactance homopolaire
xd  = 0.35;           % réactance mutuelle à l'axe d
xq  = 0.3417;         % réactance mutuelle à l'axe q
xkfl = -0.0081;      % réactance de kany
xf   = 0.0295;       % réactance de fuite

% réactance stratorique axe d
xmd = xd-xa;
% réactance stratorique axe q
xmq = xq-xa;
% réactances mutuelles
xfd = xmd;
xDd = xfd;
xqQ = xmq;

```

Suite du scripte matlab (page 2)

```

xfd = xmd + xkf1;
xDf = xfd;
xff = xmd + xkf1 + xf;
xDD = xmd + xkf1 + xD;
xQQ = xmq + xQ;

% Matrice des résistances du stator
r_s = diag([ra ra rh]);
% Matrice des résistances du rotor
r_r = diag([rf rD rQ]);
% Matrice globale des résistances du stator et rotor
R = blkdiag(-r_s,r_r);

% Matrice des réactances du stator
Xss = diag([xd xq xh]);
% Matrice des réactances mutuelles entre le stator et le rotor
Xsr = [xfd xDd 0;0 0 xqQ;0 0 0];
% Matrice des réactances du rotor
Xrr = [xff xfD 0;xDf xDD 0;0 0 xQQ];
% Matrice globale des réactances
X = [-Xss Xsr;-Xsr' Xrr];

% calcul des matrices du modèle:
% Flux rotorique
A_phi = -wn*r_r*inv(Xrr);
B_phi1 = -wn*r_r*inv(Xrr)*Xsr';
B_phi2 = wn*eye(3);

%Flux statorique
C = Xsr*inv(Xrr);
D = Xsr*inv(Xrr)*Xsr'-Xss;

% tension statorique:
J = [0 -1 0;1 0 0;0 0 0];
% Courant au rotor
A1 = inv(Xrr);
A2 = inv(Xrr)*Xsr';

% ----- Partie Mécanique -----

% Paramètres reliés à la turbine et gouverneur:

At = 1.8; % gain de la turbine
Tw = 0.1; % temps de démarrage de l'eau
beta = 0.001; % Cste de la turbine

```

Suite du scripte (page 3)

```

Ka = 30;           % Cste gain statique du servomoteur
Ta= 0.1;          % Cste de temps du servomoteur
gmin = 0.01;      % ouverture minimale du vannage
gmax = 10;        % ouverture maximale du vannage
Vgmin = 0.01;     % vitesse d'ouverture minimale
Vgmax = 10;       % vitesse d'ouverture maximale
Rp = 0.8;         % 0.02 statisme
g0 = 0.02;        % vannage initial
G0 = At*g0;
H = 0.05;         % constant d'inertie
d = 1;

% Régulation de la vitesse

Wref = 1;         % vitesse de référence
Pref = 0.6;       % puissance de référence
Pe = -0.35;       % puissance électrique
dref = 1;         % mode de fonctionnement du régulateur
w0 = 0.1;
% paramètres des régulateur:
% calcul des params PID
tau_c = 0.01;
Kp_w = 1/(tau_c*Rp*Ka);
Ki_w = Ka;
Kd_w = Ta;

% Gain du retour d'état
K_c = (1/At)*(1-(Tw*G0/2));

% %----- Partie Excitation-----

% paramètres de l'excitatrice :

% Référence article "Excitation sys param setting for power
system planing"[2].

% Données paramètres de l'excitatrice ST1

fe = 60;          % fréquence
Te = 1/fe;        % période
Te_pu = Te*2*pi;

```

Suite du scripte (page 4)

```

% params transformateur de stabilisation (pu)
Rt = 0.0159;      % resistance
L1 = 0.6e-2;     % leakage inductance
M = 0.8e-3;      % mutual inductance

% angle d'amorçage des thyristors
alpha = pi/6;

% tensions de commande :
Vs_rms = 208;
V_base = Vs_rms*sqrt(2);
Vab = sqrt(3)* Vs_rms;
Vab_pu = Vab/V_base;
VAmax = 300;
VAmin = -VAmax;
Vlmax = 4.4;
Vlmin = -Vlmax;
VRmax = 6.4;
VRmin = -VRmax;

% facteur de rectification.
Kc = 0.04;
KLR = 1;

Vref = 1;
Vstab = 0;

% Gains et cste de temps;
Tc = 1;
Tb = 1;
Kexc = 1;
Texc = 0;

% Facteur de transformation
Ke = 12;          % Ratio excitation/transfo
Ktb = 10;         % Ratio transfo/GS

% Amplification
KA = (1.35*Ke)/Ktb ;
TA = Te_pu/12;
K_f = M/Rt;
T_f = L1/Rt;

```

Suite du scripte (page 5)

```
% FT Génératrice
xmdl = 0.3399;
Rf = 0.1983;
xf = 0.0295;

Kg = xmdl/Rf;
Tg = xf/Rf;

% Capteur
Kr = 1;
Tr = 6e-3;

% Correcteur PID par compensation de pôles:

e = 0.9;           % coefficient d amortissement
wn = 1;           % pulsation propre du système
Kp = ((TA+Tg)*Tr*wn^2)/(Kr*KA*Kg);
Ki = 1/(TA+Tg);
Kd = (TA*Tg)/(TA+Tg);

% paramètres du Stabilisateur de puissance -----%

Kstab = 10;
T_w = 0.2;
T1n = 1;
T1d = 1;
T2n = 0;
T2d = 0;

%----- FIN -----%
```

Partie Optimisation par AG :

```

% Optimisation par algorithme génétique -----
% Optimisation des paramètres de l'AVR

param = [KA TA K_f T_f];
f_obj = optim_for_Efd(param);      % fonction Objective

% Optimisation AG

options =
gaoptimset('OutputFcn',@optim_for_Efd,'SelectionFcn',@selectionsto
chunif,...
    'CrossoverFcn',@crossoverscattered,...
    'MutationFcn',@mutationgaussian);
lb = [10 0.01 0.02 0.3];
ub = [400 0.1 0.1 1.5];
x = ga(@optim_for_Efd,4,[],[],[],[],lb,ub);

% fonction objective

function fobj = optim_Efd_Vs(parametre)

assignin('base','KA',parametre(1));
assignin('base','TA',parametre(2));
assignin('base','K_f',parametre(3));
assignin('base','T_f',parametre(4));

[tout,xout,yout] = sim('Control_Efd');

fobj=0;
for i =1:5001
    fobj = fobj + tout(i,1)*(yout(i,1)-1)^2;
end

```

```

% Optimisation des paramètres PID

para = [Kp,Ki,Kd];
fOb = optim_pid(para);    % fonction Objective

% Optimisation par algorithme génétique

options =
gaoptimset('OutputFcn',@optim_pid,'SelectionFcn',@selectionstochun
if,...
'CrossoverFcn',@crossoverscattered,...
'MutationFcn',@mutationgaussian);
lb = zeros(3,1)';
ub = [100 100 100];
x = ga(@optim_pid,3,[],[],[],[],lb,ub);

% fonction objective

function fOb = optim_pid(para)

assignin('base','Kp',para(1));
assignin('base','Ki',para(2));
assignin('base','Kd',para(3));

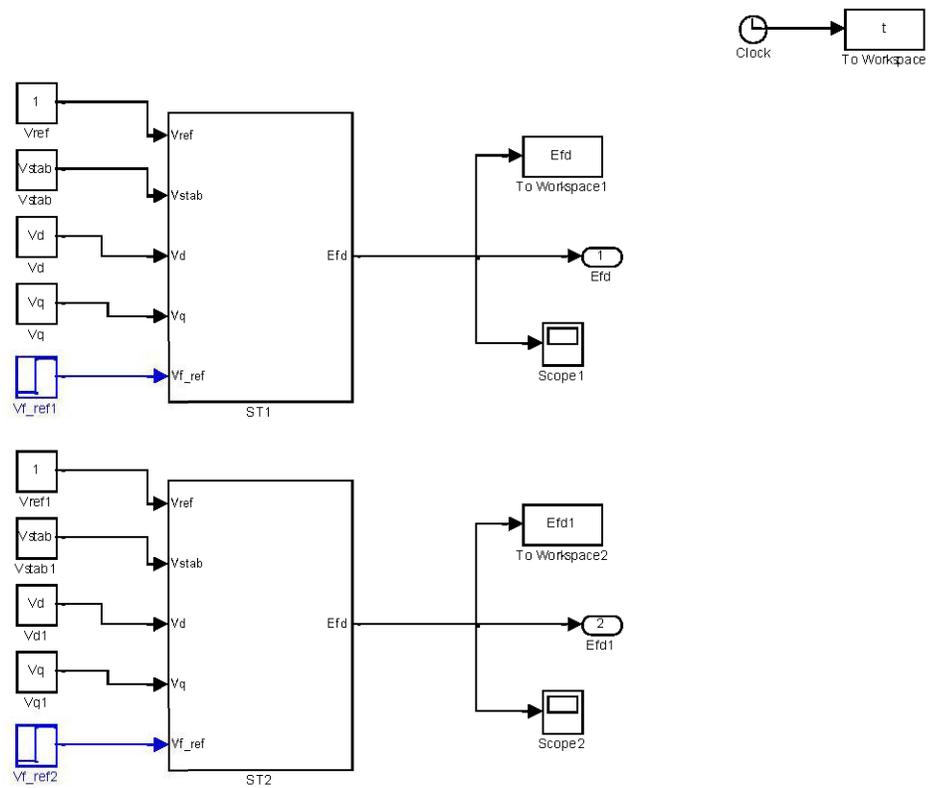
[tout,xout,yout] = sim('Control_Vs_opt');

fOb=0;
for i =1:5001
    fOb = fOb + tout(i,1)*(yout(i,1)-1)^2;
end

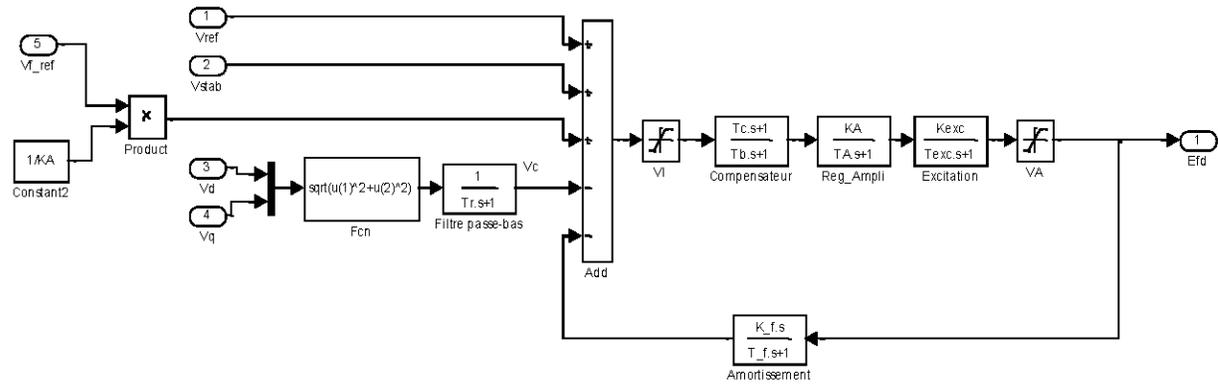
%----- FIN -----%

```

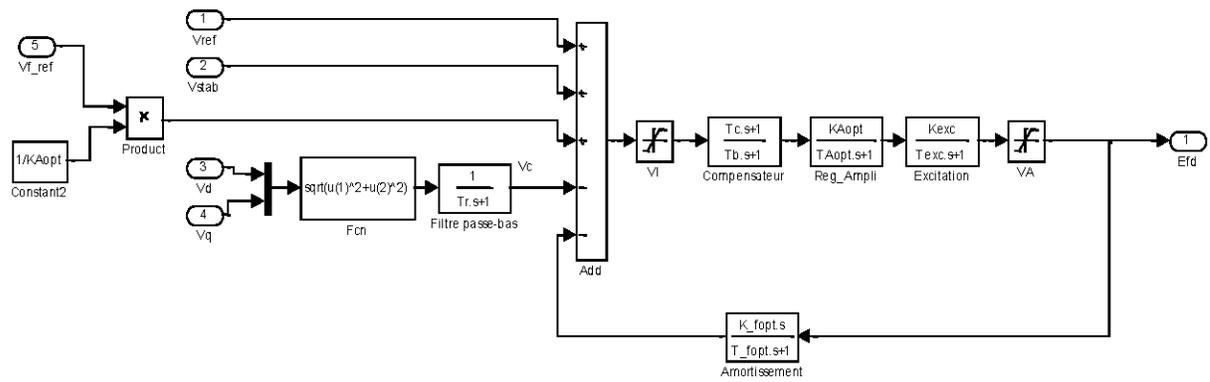
Blocs simulink associés au scripte matlab (partie optimisation par AG) :



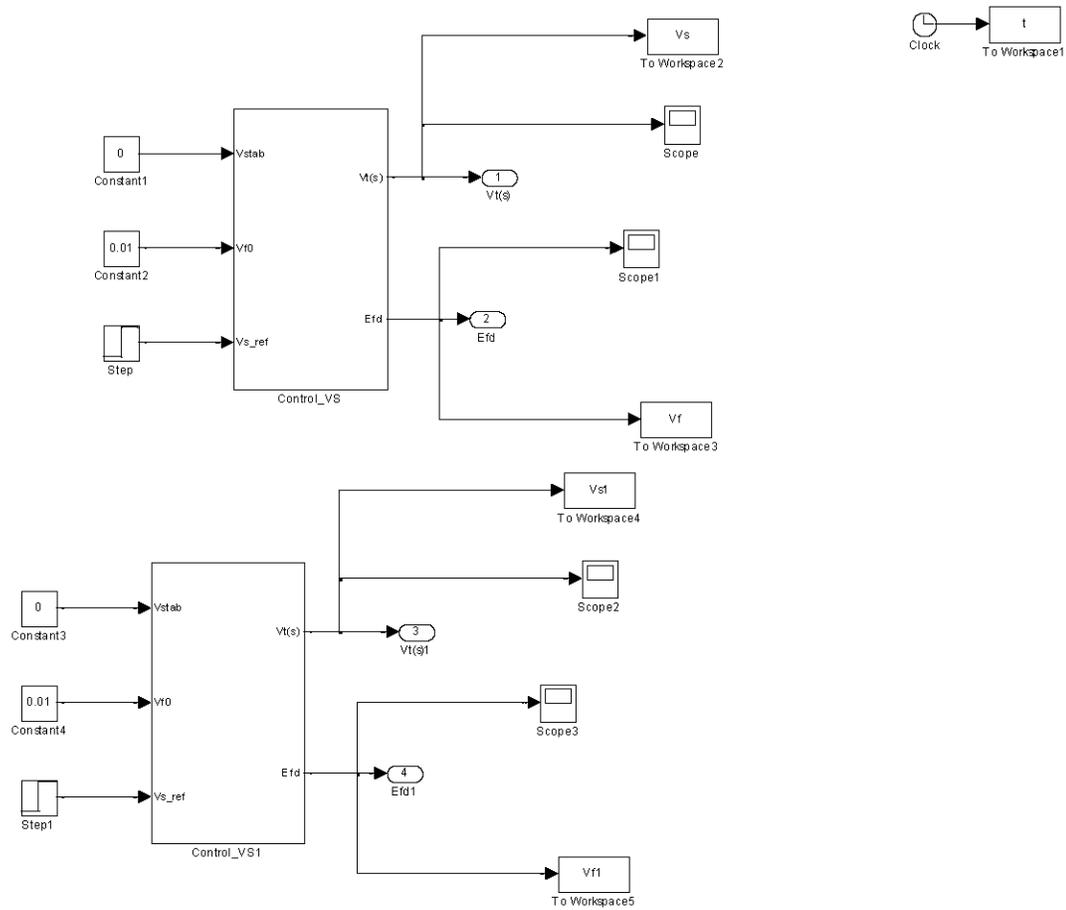
Bloc simulink – Optimisation des paramètres de l'AVR



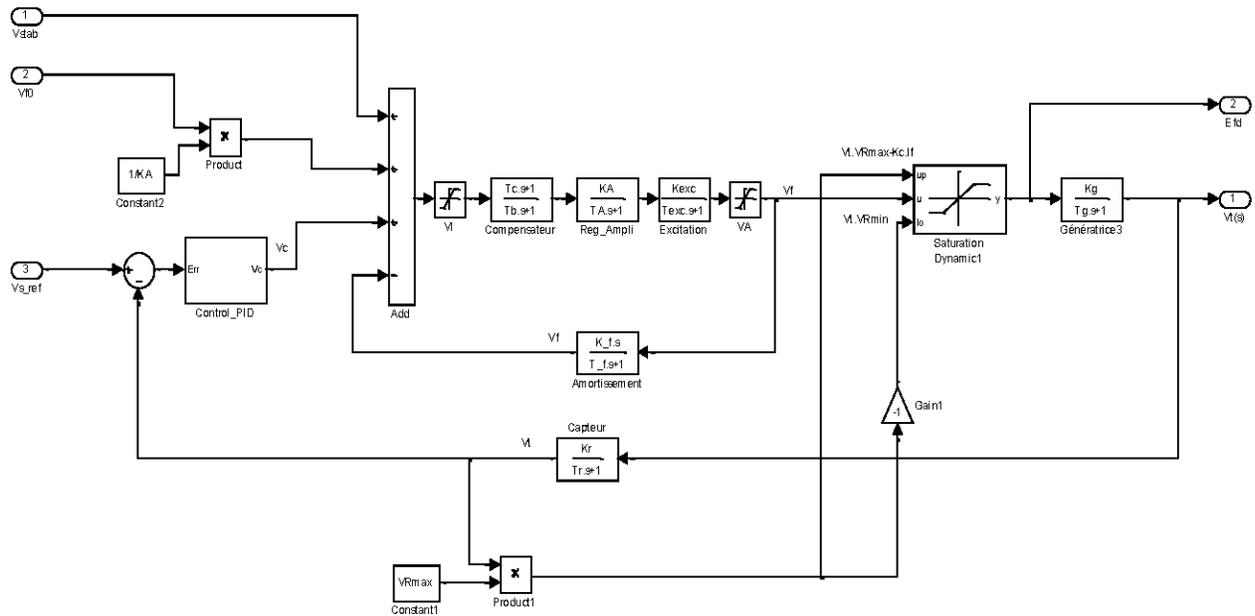
Control de tension Efd avant optimisation (bloc ST)



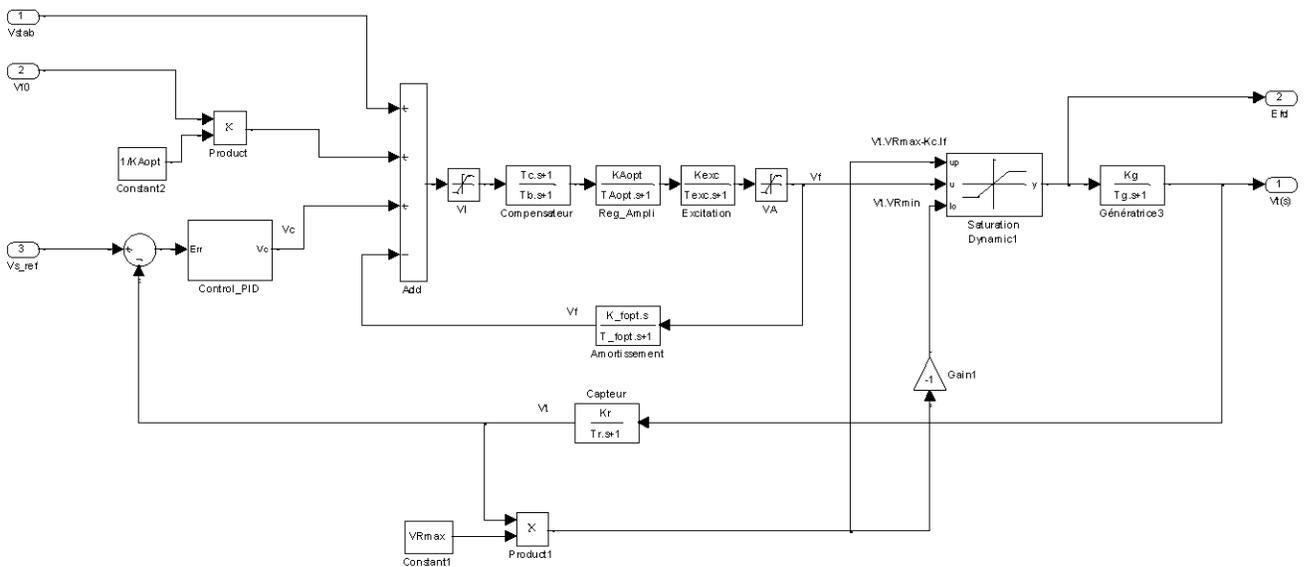
Control de la tension Efd après optimisation (bloc ST1)



Bloc simulink – Optimisation des paramètres du PID



Régulation de la tension Vs avant optimisation



Régulation de la tension Vs après optimisation