

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

**Mémoire de
Master en Electrotechnique**

Intitulé

Régulation en Tension et Vitesse d'un Alternateur

Présenté par
Messaoud HAMZA

Sous la direction de **Pr.R.Ibtiouen**
soutenu le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président : A. Mekhaldi, Professeur à l'ENP
Rapporteur : R. Ibtouen, Professeur à l'ENP
Examineur : A. Hellal, Professeur à l'ENP

ENP 2016

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص

الدراسة المطروحة في هذه المذكرة تتمحور حول نمذجة و تعديل شدة التوتر و سرعة المولد (450H) لضمان استقرار الشبكة الكهربائية و نوعية الخدمة المقدمة, لهذا الغرض قمنا بتقديم نموذج كامل انطلاقا من المعادلات الكهربائية و الميكانيكية لطاقت المولد, بهدف دراسة و تحليل سلوك المولد امام التذبذبات المستمرة للطلب على الطاقة الكهربائية, هذا النموذج قد تم تمثيله بواسطة برنامج Matlab/Simulink بغرض تحقيق التحكم في شدة التوتر و سرعة المولد (AVR, PID) النتائج المحصل عليها من النمذجة كانت مرضية مما يدل على نجاعة النموذج المطروح للمولد الكهربائي المدروس.

كلمات مفتاحية: مولد، نموذج، AVR، PID، Matlab/Simulink

Abstract

The study presented in this work focuses on modeling and regulating the terminal voltage and the speed of the generator (450H) type GE, to ensure the stability of the electrical network and quality of service. For this, a comprehensive model of turbo-generator has been developed based on the electrical and mechanical equations to analyze Generator behavior against the load disturbances. This model has been implemented on Matlab / Simulink to establish a control based on voltage and speed regulators (AVR, PID). The results of our simulations are satisfactory, showing the validity of the elaborated model.

Key-words: Generator, model, AVR, PID, Matlab / Sumilink.

Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur la régulation de la tension et de la vitesse du alternateur (450H) type GE afin d'assurer la stabilité du réseau électrique ainsi que la qualité de service. A cet effet, un modèle complet de l'alternateur a été élaboré. Il est basé sur les équations électriques et mécaniques de l'ensemble, ce qui nous permet d'avoir une idée sur le comportement de l'alternateur lors des perturbations de charge. Ce modèle a été implémenté sur Matlab / Simulink, dans le but d'établir une commande à base de régulateurs (AVR et PID) permettant de contrôler la tension et la vitesse. Les résultats de simulation sont satisfaisants et confirment la validité du modèle élaboré.

Mots-Clés : Alternateur, Modèle, AVR, PID, Matlab / Simulink.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère maman, qui a sacrifié sa vie pour notre réussite, qui nous a éclairé le chemin par son amour et ces conseils judicieux.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour, mon respect, et mes profonds sentiments envers elle.

A mon frère, et mes sœurs,

A la grande famille **HAMZA ET AMMAR MOUHOU**.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leurs générosités et leur soutien m'obligent de leur témoigner mon profond respect.

A mon meilleur ami....

A tous les gens qui m'aiment

Je tiens à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la puissance d'accomplir ce modeste travail.

Je remercie notre chef de département Mr **R.Ibiouen** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, il a toujours été là pour m'aider et me soutenir durant mon mémoire, avec lui je ne manque de rien.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et plus particulièrement ceux du département d'Électrotechnique.

Je tiens à remercier mes camarades, mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu d'une façon ou d'une autre.

Je termine ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur d'acceptant d'examiner mon travail.

Liste des figures.....(06)

Liste des symboles.....(08)

Introduction générale..... (09)

Chapitre I : Modélisation de l’alternateur

I.1 Introduction..... (11)

I.2 Modèle de l’alternateur..... (11)

I.3 Passage du système d’axe (abc) au système biphasé de Park (13)

I.4 Modèle de la machine en grandeur relative, et en valeurs réduites..... (19)

I.5 Blocs Simulink (21)

I.6 Conclusion..... (25)

Chapitre II : Régulation de la tension de sortie et de la vitesse de rotation de l’ensemble de alternateur

II.1 Introduction..... (27)

II.2 Système de contrôle..... (27)

II.3 Régulation de la tension de sortie de l’alternateur..... (28)

II.4 Régulation de la vitesse de rotation de l’alternateur..... (31)

II.5 Synthèse des régulateurs..... (32)

II.6 Schémas Blocs.....(36)

II.7 résultats de simulation..... (38)

II.8 Conclusion..... (39)

Conclusion générale.....(40)

Bibliographie(41)

Liste des figures

I.1	Schéma équivalent de la machines synchrone muni d'amortisseurs.....	(11)
I.2	Modèle de la machine synchrone dans le repère (dqo)	(15)
I.3	Réalisation du modèle de l'alternateur à vide sous environnement Simulink.....	(21)
I.4	Modèle simplifié de l'alternateur.....	(22)
I.5	Tension de l'alternateur à vide.....	(22)
I.6	Vitesse de rotation à vide.....	(23)
I.7	Les courants I_f , I_D et I_Q	(23)
I.8	Modèle de l'alternateur en charge sous Simulink.....	(24)
I.9	Courant des trois phases statoriques	(24)
I.10	Vitesse de rotation en charge.....	(25)
II.1	Circuit de contrôle.....	(27)
II.2	Représentation du groupe de régulation.....	(28)
II.3	Modèleschématiqued'unrégulateur.....	(29)
II.4	Modèle du système d'excitation IEEE-type ST1.....	(30)
II.5	Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1.....	(30)
II.6	Modèle schématique d'un régulateur AVR.....	(31)
II.7	Principe de régulation de la vitesse.....	(31)
II.8	Régulateur PID et servomoteur.....	(31)
II.9	Quelques systèmes à réguler.....	(32)
II.10	Schéma fonctionnel d'un correcteur PI.....	(33)
II.11	Schéma fonctionnel d'un correcteur PD.....	(34)
II.12	Schéma fonctionnel d'un correcteur PID.....	(34)
II.13	Structure combinée de la génératrice et les blocs de régulation sous Simulink.....	(37)
II.14	Structure du régulateur de tension de sortie sous Simulink.....	(37)

II.15	Structure du régulateur de la vitesse(W_r) sous Simulink.....	(37)
II.16	Courants des trois phases à $t=2s$	(38)
II.17	Tension de sortie (V_t) et Vitesse (W_r) de l'alternateur à $t=2s$	(38)
II.18	Angle interne (δ) et glissement de l'alternateur à $t=2s$	(39)

Liste des symboles

$V_{a, b, c}$	Les Tensions des phases a,b,c respectivement.
$\Psi_{a, b, c}$	Les flux magnétiques des trois enroulement statorique a,b,c respectivement.
$i_{a, b, c}$	Les courants des phases a,b,c respectivement.
$V_{f, D, Q}$	Les Tensions d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
$\Psi_{f, D, Q}$	Les flux magnétiques d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
$i_{f, D, Q}$	Les courant d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
T_m	Le couple mécanique.
T_e	Le couple électromagnétique.
P_e	Puissance électrique.
w_s	La vitesse de synchronisme.
w_r	La vitesse de rotation.
δ	L'angle interne de l'alternateur
g	Le glissement de rotor
L_d	L'inductance propre d'axe direct.
L_q	L'inductance propre d'axe quadrature.
L_f	L'inductance propre d'excitation.
L_D	L'inductance propre d'amortisseur d'axe direct.
L_Q	L'inductance propre d'amortisseur d'axe quadrature.

Introduction générale

L'alternateur est l'un des éléments les plus essentiels dans la production de l'énergie électrique. Mais ces systèmes font face aux différentes contraintes, car de faibles ou importantes perturbations, telles que les variations de charge, les défauts de court-circuit ou encore la perte de synchronisme peuvent affecter le système de puissance à tout instant et peuvent, dans certains cas, l'emmener en dehors des régions de stabilité. Ce qui peut conduire alors un déséquilibre du réseau. Ces perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique et la puissance électrique. L'écart se traduit donc par une variation au niveau de la vitesse de rotation de l'alternateur, ainsi qu'une variation au niveau de la tension de sortie. Les turboalternateurs dans les centrales de production doivent adapter en permanence leur point de fonctionnement à des valeurs nominales. Ils sont le plus souvent soumis à des fortes contraintes pour maintenir la vitesse et la tension à la valeur assignée tel que le risque de survitesse lorsque la fréquence diminue.

Pour assurer la stabilité du réseau électrique ainsi que la sécurité au niveau des installations, il faut mettre en œuvre des dispositifs de régulation. Ces derniers doivent commander de façon instantanée les turboalternateurs contre les différentes perturbations auxquelles ils sont exposés. Ces systèmes de régulation doivent également garantir le fonctionnement de ces machines dans des limites acceptables. C'est ce à quoi je m'intéresse pour garantir la stabilité du système par l'insertion des régulateurs de type PID (Proportionnel Intégral Dérivé) dans les systèmes de commande. L'étude du système en régime dynamique nécessite un modèle mathématique pour le calcul et l'analyse. Donc je développer un modèle pour analyser le fonctionnement d'un Alternateur.

Enfin, je réalise une régulation pour la tension de sortie par application d'un régulateur "AVR" (Régulateur Automatique de Tension), au niveau du système d'excitation, et un système de régulation PID permettant de réguler la vitesse de rotation de l'alternateur.

Chapitre I

Modélisation du l'alternateur

I.1. Introduction

Dans ce chapitre je développe des modèles numériques de chaque élément du groupe turbine-alternateur. Un rappel sur les différentes équations mécaniques et électriques de l'ensemble (turbo-alternateur) est donné dans ce chapitre. Un choix adéquat du modèle permet de connaître le comportement dynamique et vérifie aisément la stabilité du système. De plus, il est possible de faire varier les paramètres de la génératrice dans le but d'avoir les performances souhaitées.

On présentera le modèle mathématique de la génératrice synchrone et son système d'excitation dans le repère triphasé **(abc)** puis dans le référentiel de **(Park)**. Ensuite, on donnera le modèle mathématique de la génératrice synchrone couplée à un réseau de puissance infini. Un modèle simplifié de la turbine à gaz est donné à la fin de ce chapitre.

I.2. Modèle de l'alternateur

- Description

La machine synchrone à pôle lisse est composée d'un induit triphasé généralement fixe, et d'un inducteur tournant alimenté en courant continu. Le bobinage de l'inducteur est réparti dans des encoches fraisées dans la masse du rotor cylindrique.

Dans le cas d'une machine à pôles lisses, la partie massive du fer rotorique joue le rôle d'amortisseur.

- Modèle Mathématique

La machine de notre cas d'étude, possède trois enroulements statoriques a, b et c décalés de 120 degrés. Le rotor comporte un nombre d'enroulements équivalents, répartis selon deux axes : l'axe direct qui coïncide avec celui de l'enroulement d'excitation et qui possède un deuxième enroulement fictif qui représente l'effet des amortisseurs, et l'axe en quadrature perpendiculaire au précédent ayant un enroulement fictif représentant l'effet des amortisseurs.

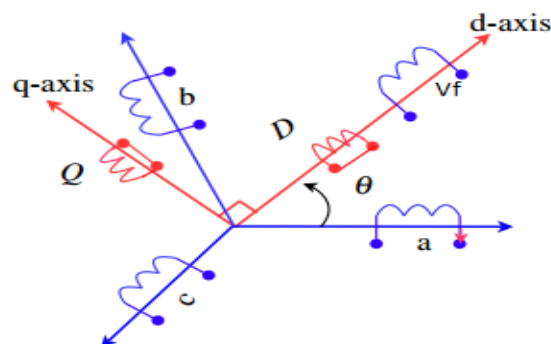


Fig I.1: Schéma équivalent de la machine synchrone muni d'amortisseur,[3][6].

Le schéma simplifié de la machine est donnée par la figure 3.1 dans lequel, les bobinages D et Q représentent, respectivement les amortisseurs au niveau du rotor d'axe direct et d'axe quadrature. Les bobinages a, b et c sont les trois phases du générateur synchrone, et Θ représentent l'angle électrique en fonction du nombre de pôles.

- Hypothèses

Afin de simplifier la mise en équations du système, il est nécessaire d'introduire quelques hypothèses simplificatrices, à savoir :

- Les courants de Foucault sont supposés négligeables. Cette hypothèse permet d'exprimer tous les flux de la machine en fonction des courants, des inductances propres et mutuelles,
- Les résistances (d'induit et d'inducteur) de la machine sont invariantes par rapport aux variations de la température,
- Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté, de sorte que seuls les circuits inducteurs, induits et amortisseurs sont parcourus par des courants,
- On admet que les forces magnétomotrices des enroulements du stator sont à répartition sinusoïdale, ce qui conduit à des expressions des inductances relativement simples,
- La saturation du circuit magnétique ne sera pas prise en compte, [9].

- Equations de tension au stator

Les équations de tensions sont données comme suit, [10] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

- Equations en tension du rotor

La fonction de base du système d'excitation est de fournir un courant continu aux bobines, en créant un champ au rotor de la machine synchrone. De plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive. D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation contribue au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du

système. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations intempestives.

Le circuit d'excitation est alimenté tandis que les amortisseurs sont court-circuités. Les équations électriques produites au niveau du rotor sont les suivantes, [6] [7] :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Comme les enroulements amortisseurs des deux axes sont court-circuités, les deux valeurs de tension sont nulles, on obtient alors le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Les équations mécaniques qui correspondent au fonctionnement mécanique de l'alternateur synchrone sont, [10] :

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - Dw_r) \\ \frac{d\delta}{dt} = w_s (w_r - 1) \\ T_e = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q \end{cases} \quad (1.4)$$

I.3 Passage du référentiel d'axe (abc) au référentiel de Park

L'ensemble des équations électriques statoriques, rotoriques avec l'équation mécanique définissent le modèle de la machine en fonctionnement dynamique. Ce modèle fait apparaître des difficultés pour sa résolution numérique.

- D'une part, l'ordre du système est élevé,
- et d'autre part, les matrices des paramètres sont fonctions de l'angle (Θ) de rotation donc du temps.

Afin d'obtenir des équations plus simples, nous avons recherché des transformations permettant d'abaisser l'ordre du système et d'éliminer cette dépendance vis-à-vis de (Θ). La transformation la plus utilisée et celle de Park, qui consiste à faire une projection des variables reliées au stator dans un référentiel qui tourne avec le rotor, afin de rendre les inductances mutuelles du modèle de la machine indépendantes de la rotation.

La matrice de transformation de Park $[P(\Theta)]$ permet le passage des grandeurs statoriques V_a , V_b , V_c et i_a , i_b , i_c à leurs composantes relatives V_o , V_d , V_q et i_o , i_d , i_q . Elle est donnée par la formule suivante, [1]:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

La matrice de passage de Park n'est pas orthogonale. En divisant chaque vecteur colonne par sa norme, on obtient une matrice orthogonale dite transformation de Park modifiée $[P_M(\Theta)]$. Cette transformation permet de garder l'invariance des puissances instantanées dans les deux systèmes d'axes (abc) et (dqo) afin d'avoir l'équivalence physique, [1] telle que :

$$[P_M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Les enroulements rotoriques ne subissent aucune transformation puisqu'ils sont par construction ordonnés suivant deux axes perpendiculaires. La transformée de Park est applicable pour les tensions, courants et flux et on obtient alors :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

On pose :

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix}; V_{dqo} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix}; \Psi_{dqo} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix}; i_{dqo} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix}$$

Le système d'équations devient :

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} \quad (1.10)$$

On remplace les équations (3.7), (3.8) et (3.9) dans la relation (3.10) on obtient :

$$V_{dqo} = [P_M] * [R] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1} * \Psi_{dqo}] \quad (1.11)$$

$$V_{dqo} = [R] * [P_M] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * [P_M]^{-1} * \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} \quad (1.12)$$

$$+ [P_M] * \Psi_{dqo} * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1}]$$

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + w_s * \Psi_{dqo} * [P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] \quad (1.13)$$

Avec

$$\frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\Theta) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 4\pi/3) & -\cos(\Theta + 4\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Et,

$$[P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Après avoir remplacé l'équation (3.15) dans (3.13) on obtient l'équation de la loi d'ohm généralisée au niveau du stator :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} + w_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Soit

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \\ V_o = -r_a i_o + \frac{d}{dt} \Psi_o + 0 \Psi_o \end{cases} \quad (1.17)$$

Etant donné l'axe homopolaire nul, on ne prend que les deux premières équations du système (3.18), on obtient le nouveau modèle dans le repère (**dqo**) :

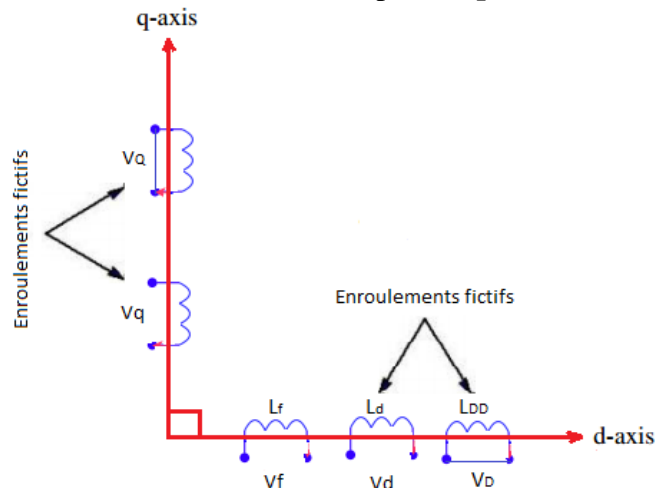


Fig I.2 : Modèle de la machine synchrone dans le repère (dqo)

Le système suivant représente les équations au rotor et au stator, [4] :

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \\ V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \\ 0 = r_D i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D \\ 0 = r_Q i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q \end{cases} \quad (1.18)$$

Dans les expressions de tension V_d et V_q on voit l'apparition des **f.e.m statiques** ($\frac{d}{dt} \Psi_d$, $\frac{d}{dt} \Psi_q$) dues aux variations des flux et des **f.e.m dynamiques** ($\omega_r \Psi_q$, $\omega_r \Psi_d$) dues à la rotation, [1]. La nouvelle forme obtenue du modèle de l'alternateur est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

- Détermination des expressions des flux en fonction des courants

Le flux total à travers la bobine équivalente au stator sur l'axe direct et l'axe quadrature (Ψ_d et Ψ_q) ainsi que les flux à travers l'enroulement d'excitation, et l'enroulement amortisseur sur l'axe d et l'axe q, (Ψ_f , Ψ_D et Ψ_Q) peuvent être exprimés en fonction des courants et des inductances propres et mutuelles, [1] [2] :

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d i_d + M_{df} i_f + M_{dD} i_D \\ \Psi_q = -L_q i_q + M_{qQ} i_Q \\ \Psi_f = -M_{df} i_d + L_f i_f + M_{fD} i_D \\ \Psi_D = -M_{dD} i_d + M_{Df} i_f + L_D i_D \\ \Psi_Q = -M_{qQ} i_q + L_Q i_Q \end{cases} \quad (1.20)$$

Les expressions des flux en fonction des courants sous forme matricielle sont :

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

On remplace les flux de la relation (1.21) dans le système d'équations (1.19), et on obtient le modèle régissant le fonctionnement de l'alternateur en fonction des courants, [2] [4] :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\
 &+ \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1.22)
 \end{aligned}$$

Le système (3.22) peut être écrit sous la forme simplifiée suivante :

$$V = [R_a] * I + [A] * \frac{dI}{dt} + [G] * I \quad (1.23)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 [R_a] &= \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad \text{et} \\
 [G] &= \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La tension aux bornes du générateur V_t est donnée par l'équation suivante [2] :

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (1.24)$$

Le courant statorique est obtenu de la même manière telle que [2] :

$$i_m = (i_d^2 + i_q^2)^{1/2} \quad (1.25)$$

La puissance P_e à la sortie du générateur est donnée par [2] :

$$P_e = V_d i_d + V_q i_q \quad (1.26)$$

Dans ce cas, la chute de tension au niveau des trois différentes phases est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} dV_a = L_t \frac{di_a}{dt} - R_t i_a \\ dV_b = L_t \frac{di_b}{dt} - R_t i_b \\ dV_c = L_t \frac{di_c}{dt} - R_t i_c \end{cases} \quad (1.27)$$

Afin de pouvoir intégrer ces équations avec le modèle (1.22) de l'alternateur, il faut procéder à un changement de repère en utilisant la transformé de Park donnée par l'équation (1.6), c'est-à-dire, passer du repère (abc), vers le repère (d-q). L'utilisation de cette transformation permet d'obtenir les équations suivantes, [2]:

$$dV_d = V_d - V_s \sin(\delta) = L_t \frac{di_d}{dt} - L_t \omega_r i_q + R_t i_d \quad (1.28)$$

$$dV_q = V_q - V_s \cos(\delta) = L_t \frac{di_q}{dt} + L_t \omega_r i_d + R_t i_q \quad (1.29)$$

Les équations de l'alternateur deviennent, [2][8] :

$$\begin{bmatrix} V_s \sin(\delta) \\ V_s \cos(\delta) \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_a + R_t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(r_a + R_t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -(L_d + L_t) & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -(L_q + L_t) & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -x_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -x_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} +$$

$$\omega_r \begin{bmatrix} 0 & (L_q + L_t) & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -(L_d + L_t) & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Dans cette partie, nous avons présenté la machine synchrone en décrivant ses différentes parties et son principe de fonctionnement en mode alternateur. Nous avons développé des modèles permettant d'étudier le fonctionnement de la machine en régime transitoire, ainsi que les contraintes s'exerçant sur la machine de façon relativement précise.

I.4 Modèle de la machine en grandeur relative, et en valeur réduite

Le système «per unit» permet d'avoir des ordres de grandeur relatifs à un certain nombre de paramètres indépendamment des niveaux de tensions et de puissance. De plus, l'utilisation de ce système simplifie certaines relations et schémas équivalents.

Ce système associe, à une variable quelconque «x», une valeur de base «x_{base}» et la compare à sa valeur réelle «r_{elle}» dans le but de l'exprimer dans un système sans dimensions «p.u.».[11]

La notion de valeur réduite est associée à la notion de grandeurs nominales. Dans le cas d'un alternateur, elle est caractérisée par :

- La puissance apparente nominale S_n
- La tension nominale entre phase et neutre V_n , ou la tension nominale composée entre deux phases U_n , avec :

$$V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (1.31)$$

- Le courant nominal I_n , qui représente le courant de ligne, avec :

$$S_n = 3V_n I_n = \sqrt{3} U_n I_n \quad (3.32)$$

On introduit également l'impédance nominale Z_n , tel que :

$$Z_n = \frac{V_n}{I_n} \quad (1.33)$$

La notion de valeurs réduites peut être utilisée aux régimes quelconques, c'est à dire aux valeurs instantanées des courants, tensions ainsi qu'aux différentes équations mathématiques (nombres complexes, transformées de Laplace ...). Mais, dans ce cas on est amené à diviser chaque grandeur physique, pour la ramener en valeur réduite, non pas forcément par sa valeur nominale, mais par valeur dite «de base». Certaines valeurs de base peuvent être choisies arbitrairement avec la considération de leur commodité, en respectant certaines règles de cohérence, notamment sur le plan de la conservation de l'énergie.

Les avantages de l'utilisation des valeurs réduites sont les suivantes :

- les ordres de grandeurs des impédances en valeur réduite d'une famille de machines sont peu variables d'une machine à l'autre, si bien que l'utilisation des valeurs réduites permet de mieux apprécier et interpréter les similitudes comme les différences du comportement de ces machines.
- les courants et les tensions en valeur réduite fournissent rapidement une estimation de la gravité des contraintes résultant du régime étudié. [11]

Valeurs réduites relatives d'axe (d-q)

On choisira $\sqrt{2} * I_n$ (I_n courant nominal de l'alternateur) comme valeur de base pour les courants statoriques et on posera [11] :

$$i_d(p.u) = \frac{i_d}{\sqrt{2} * i_n} \quad i_q(p.u) = \frac{i_q}{\sqrt{2} * i_n} \quad (1.34)$$

De même on choisira $\sqrt{2} * V_n$ (V_n tension nominale à la sortie de l'alternateur) comme valeur de base :

$$V_d(p.u) = \frac{V_d}{\sqrt{2} * V_n} \quad V_q(p.u) = \frac{V_q}{\sqrt{2} * V_n} \quad (1.35)$$

Les différentes puissances électriques (active, réactive, apparente) auront comme valeur de base : ($3 * V_n * I_n$), on prend un exemple de la puissance active :

$$P_e(p.u) = \frac{P_e(W)}{3 * V_n * i_n} \quad (1.36)$$

Pour la dimension du temps, on lui a conservé son unité habituelle (seconde). Pour les flux on a choisi une valeur de référence égale a ($\Psi_{ref} * \omega$) soit :

$$\Psi_d(p.u) = \frac{\Psi_d(Wb)}{\Psi_{ref} * \omega_s} \quad \Psi_q(p.u) = \frac{\Psi_q(Wb)}{\Psi_{ref} * \omega_s} \quad (1.37)$$

Ce qui permet d'avoir les quantités ($\omega_s * \Psi_d$) et ($\omega_s * \Psi_q$) en régime permanent, qui seront en grandeur de l'unité. Pour avoir le couple en valeur réduite, il est commode de définir un couple nominal par référence à la puissance nominale apparente :

$$C_n = \frac{3 * V_n * i_n}{\omega_s} \quad (1.38)$$

D'où le couple, en valeur réduite, donné par :

$$C_e(p.u) = \frac{C_e(N.m)}{C_n} \quad (1.39)$$

I.5 Blocs Simulink

Les équations précédentes, ont permis de déterminer les modèles Simulink des différentes sous ensemble (turbo-alternateur).

- Bloc de l'alternateur à vide

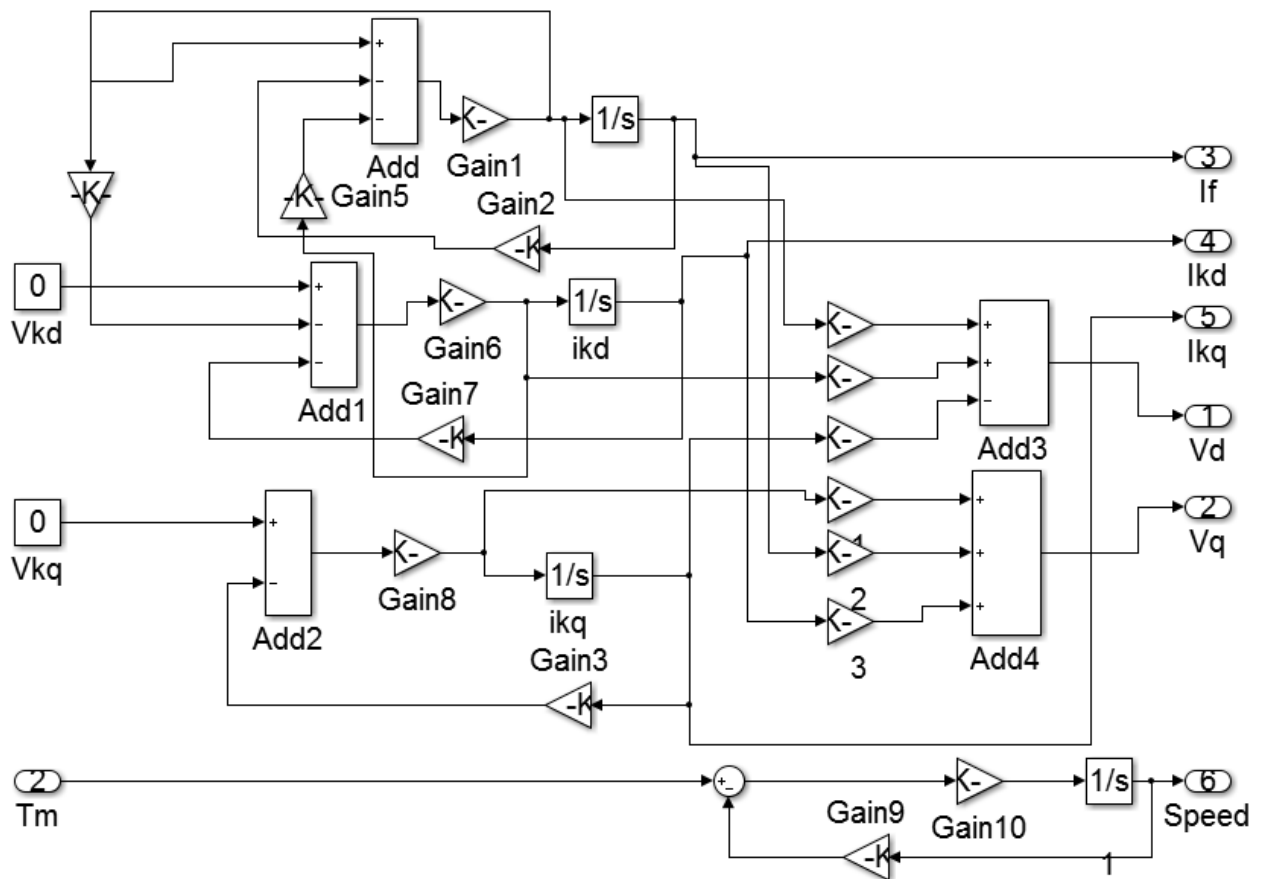


Fig.I.3 : Réalisation du modèle de l'alternateur à vide sous environnement Simulink

Le modèle de l'alternateur peut être représenté par un bloc possédant deux entrées et six sorties tel que représenté dans la figure suivante :

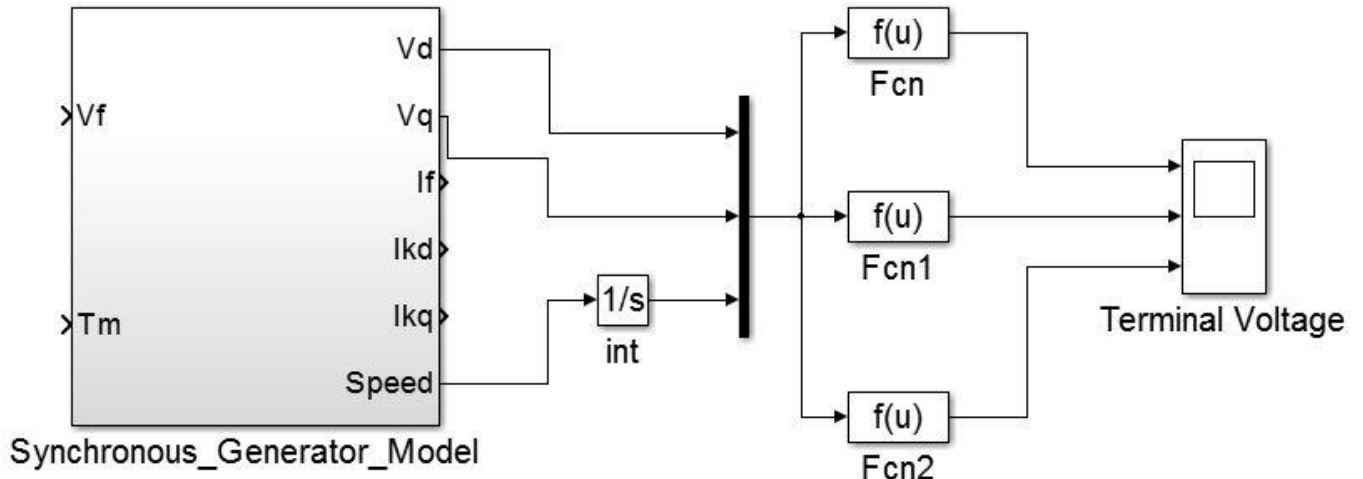


Fig.I.4 : Modèle simplifié de l'alternateur

- Résultats de simulation de l'alternateur à vide

La tension de sortie à vide des trois phases au niveau du stator est donnée par la figure suivante :

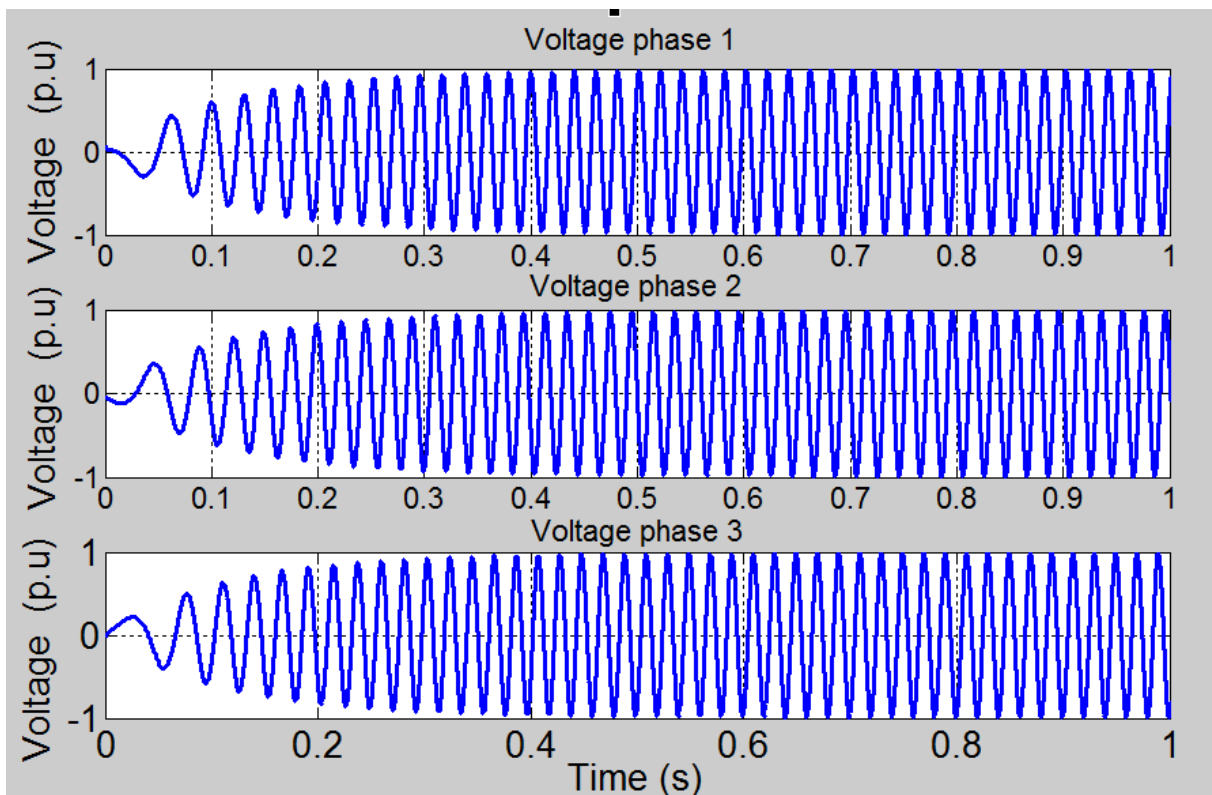


Fig.I.5 : Tension de sortie de l'alternateur à vide

La vitesse de rotation est donnée par la figure suivante :

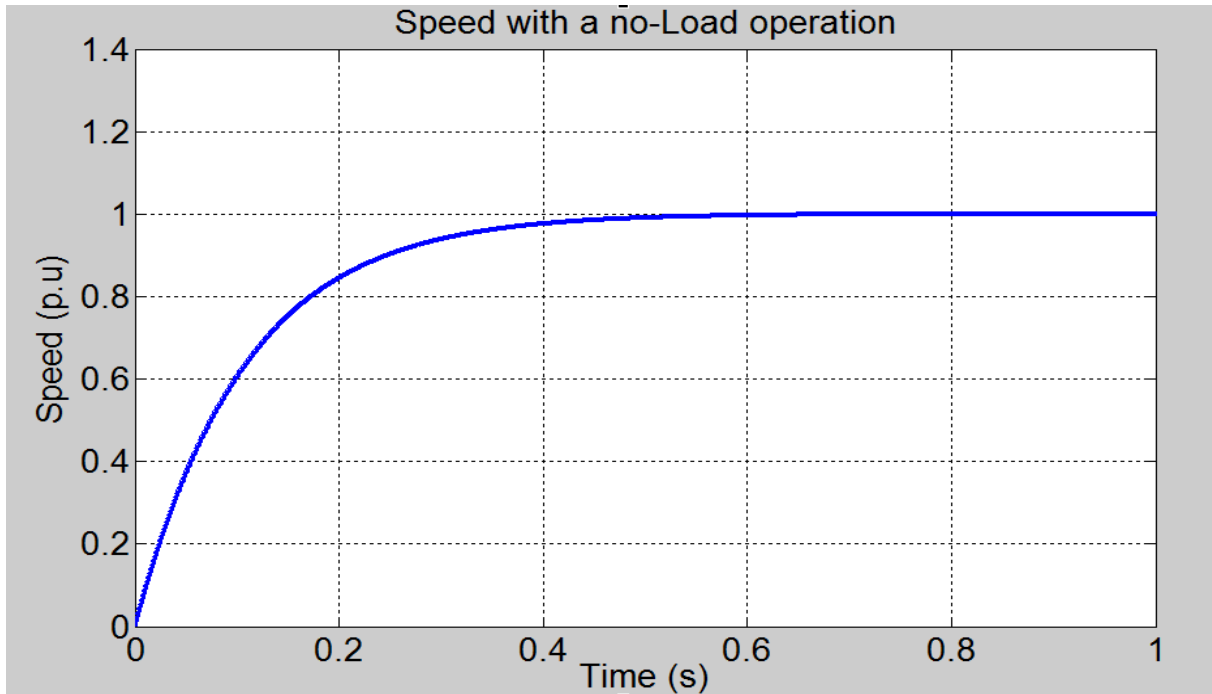
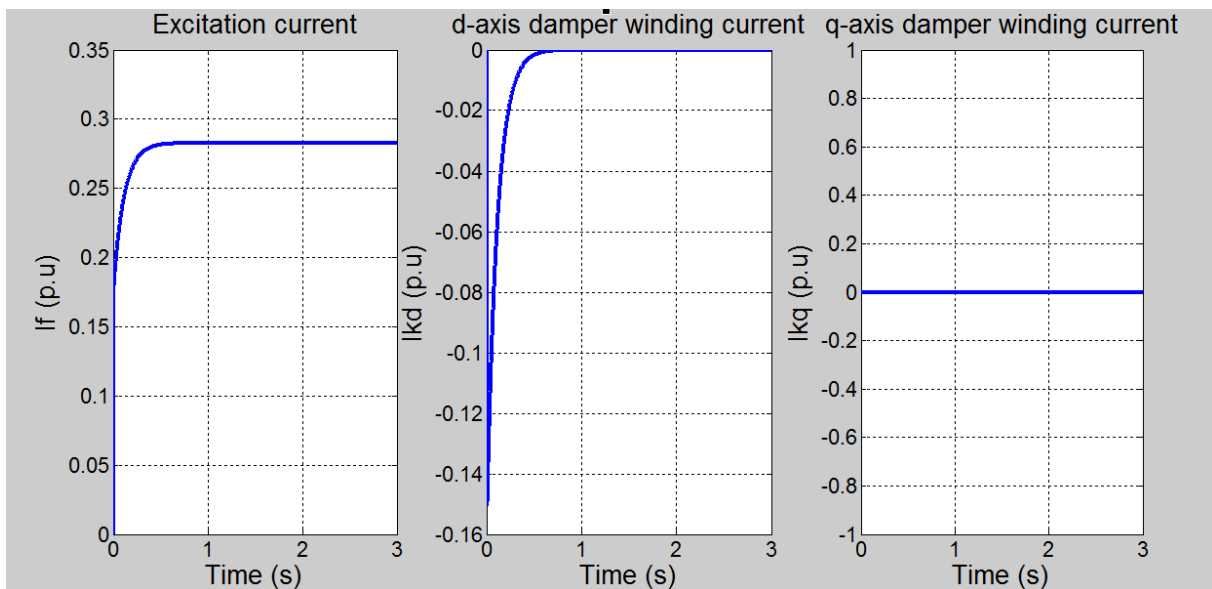


Fig.I.6 : vitesse de rotation à vide

Le courant d'excitation, le courant d'enroulement amortisseur sur l'axe d et q, sont représentés par la figure suivante :

Fig.I.7 : les courants I_f , I_D et I_Q

- Schéma Bloc de l'alternateur en charge

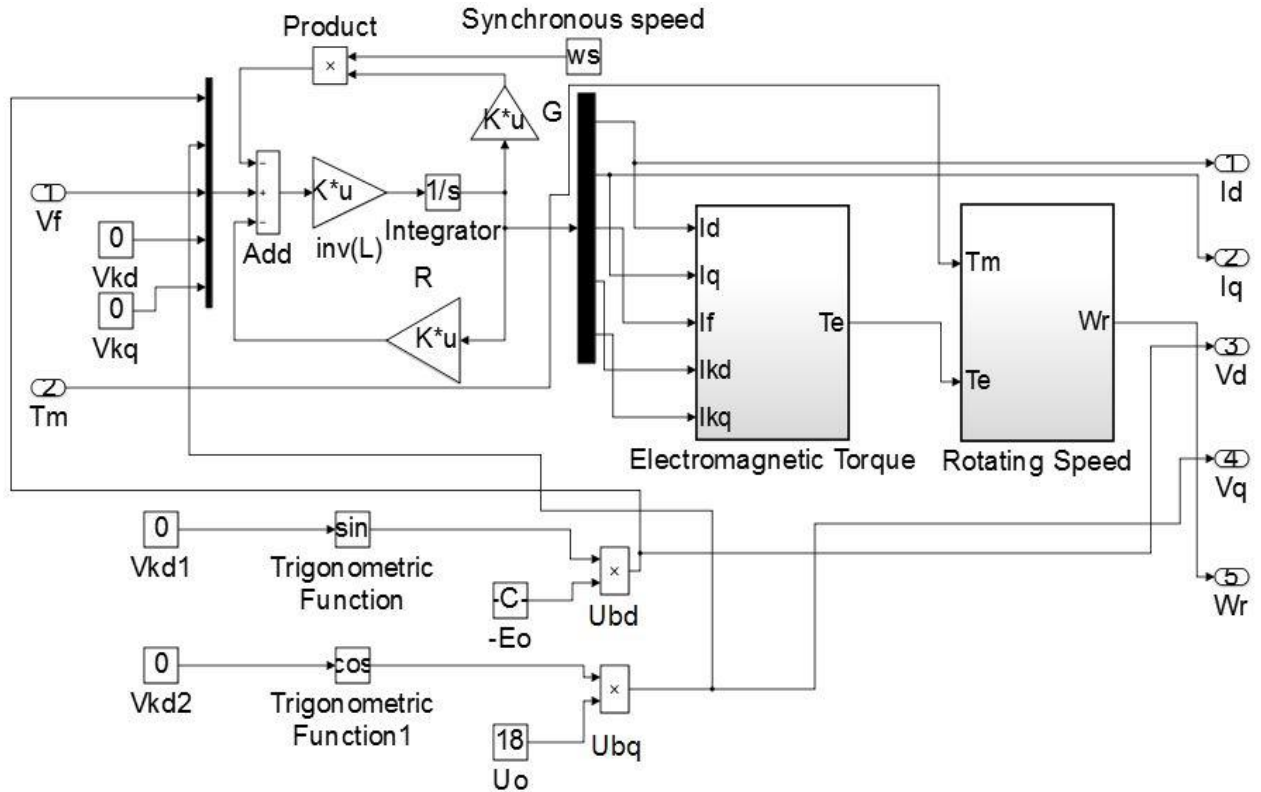


Fig.I.8 : Modèle de l'alternateur en charge sous Simulink

- Résultats de simulation de l'alternateur en charge

Nous présentons à la Fig.3.13, les courants statoriques et la vitesse de rotation de la génératrice en charge à la Fig.3.14.

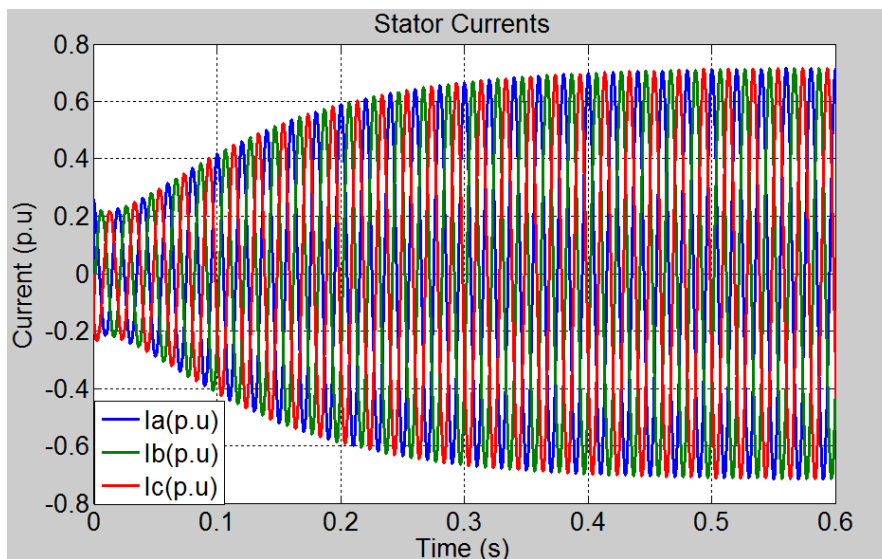


Fig.I.9 : Courants des trois phases statoriques

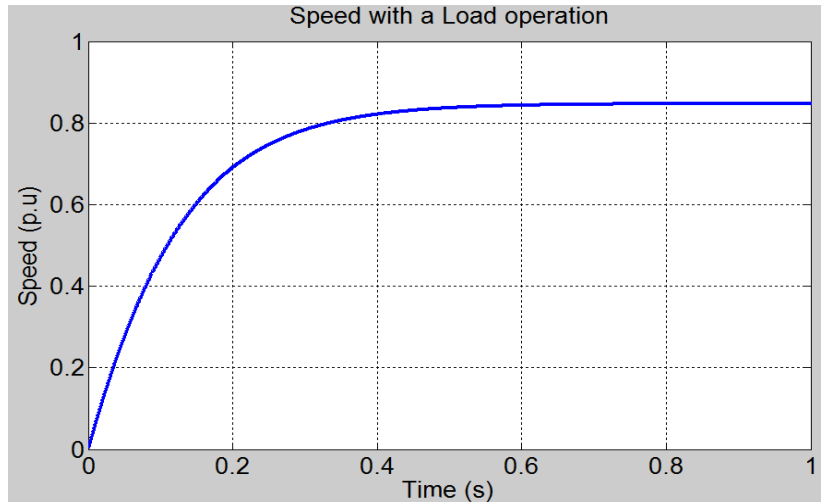


Fig.I.10: Vitesse de rotaion en charge

- Interprétation des résultats

Les résultats de simulations obtenus à vide et en charge montrent que lorsque la charge augmente, la tension de sortie diminue et la vitesse de rotation également. On a remarqué que chaque perturbation au niveau de la charge influe directement sur la tension de sortie et la vitesse de rotation du générateur.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation complète du l'alternateur, afin de pouvoir étudier son comportement dynamique. Nous avons réalisé dans un premier temps un test de fonctionnement à vide, puis en charge. Ces essais ont permis de valider les paramètres de simulation de la génératrice synchrone.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que lorsque la génératrice subit une variation de charge (perturbation), cette variation introduit une perturbation au niveau de la tension de sortie et une perturbation au niveau de la vitesse de rotation de la génératrice. Afin de garder la tension et la fréquence du réseau à une valeur constante pour obtenir une bonne qualité d'écoulement d'énergie électrique, il est nécessaire d'introduire la notion de commande et de régulation afin de maintenir le niveau d'équilibre. Le chapitre suivant sera consacré à la stabilité.

Chapitre II

Régulation de la tension de sortie et de la vitesse de rotation de l'alternateur

II.1 Introduction

Dans les grands réseaux électriques, il est important de conserver et maintenir la fréquence et la tension à leurs valeurs nominales, afin d'avoir un fonctionnement adéquat et un équilibre entre la puissance produite et celle consommée.

En effet, le plus grand problème de l'énergie électrique est le stockage, par conséquent, les quantités nécessaires pour faire face aux variations de la demande et aux incidents, doivent être produites instantanément au moment où elles sont demandées.

Une augmentation de la demande d'énergie provoque des creux de tension et une diminution de la vitesse de rotation donc de la fréquence du réseau. A l'aide de capteurs, la valeur de la vitesse sera mesurée et corrigée automatiquement par des régulateurs de vitesses en augmentant l'admission de la quantité du combustible (gaz) au niveau de la turbine, et ce afin de ramener la vitesse à sa valeur nominale. Il en est de même pour la tension de sortie qui doit être régulée grâce à l'excitatrice.

II.2 Systèmes de contrôle

Les systèmes de contrôle sont composés de deux dispositifs essentiels, tels que, représentés dans la **Fig.II.1**.

- Le premier, dispositif servant à réguler la tension de sortie de l'alternateur à travers son excitatrice, la tension de sortie doit être maintenue autour de 18500V quel que soit la perturbation de charge.
- Le second, dispositif servant à réguler la vitesse de rotation et à la maintenir à une valeur constante par adaptation de la puissance mécanique. La vitesse de fonctionnement de la génératrice dépend de la fréquence du réseau. Elle est fixée à 3000 tr/min, [1].

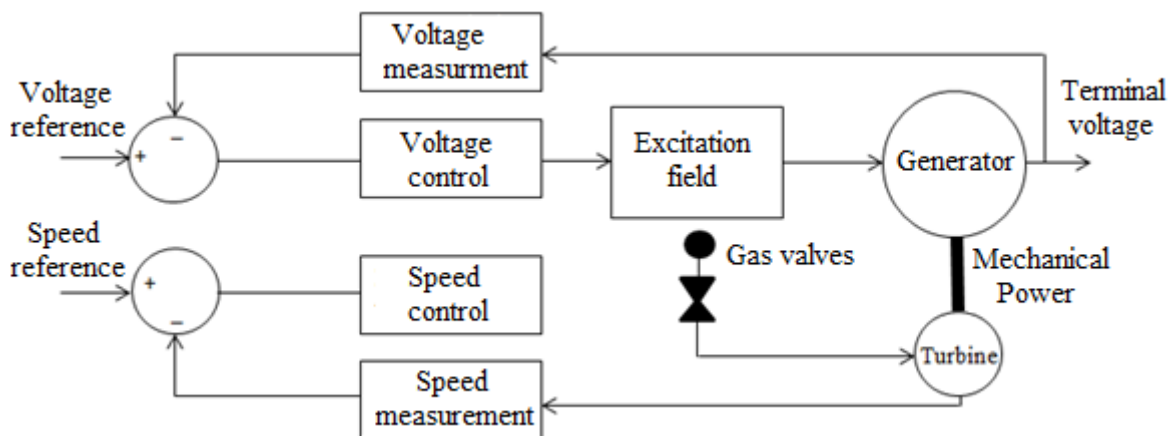


Fig.II.1 : Circuit de contrôle [1]

II.3 Régulation de la tension de sortie de l'alternateur

Le contrôle de la tension est un concept fondamental, qui permet d'assurer la continuité du service, de fournir une bonne qualité d'énergie aux consommateurs, et surtout de créer l'équilibre entre la puissance produite et celle consommée. Pour assurer cette régulation, il est nécessaire d'introduire un contrôleur appelé "**régulateur automatique de tension AVR**", qui a pour tâche principale de maintenir l'amplitude de la tension aux bornes du générateur synchrone à un niveau spécifié. Ce dernier permet d'assurer l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon le besoin de la charge. Ce contrôleur représente un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur et permet de régler le flux magnétique dans la machine donc régler la tension de sortie à une valeur spécifiée, [1] [10]. La **Fig.II.2** montre un modèle simplifié du régulateur AVR utilisé :

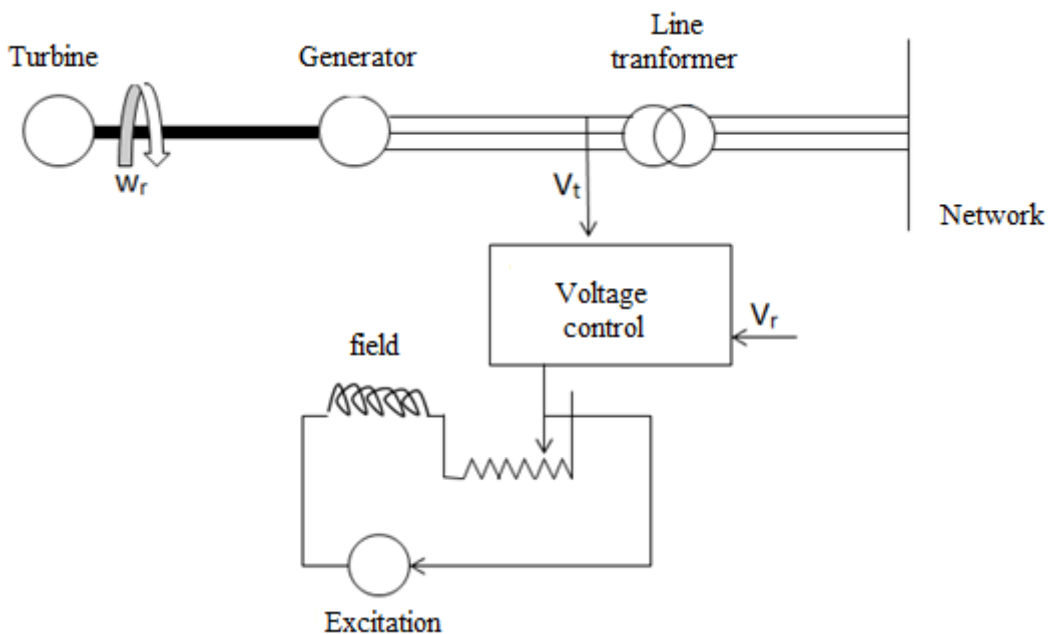


Fig.II.2 : représentation du groupe de régulation

Le modèle schématique utilisé dans notre étude est représenté dans la **Fig.II.3**, il est composé essentiellement d'un capteur de tension, d'un comparateur (Sommateur), d'un amplificateur, d'un régulateur PID et d'un système de limitation de tension.

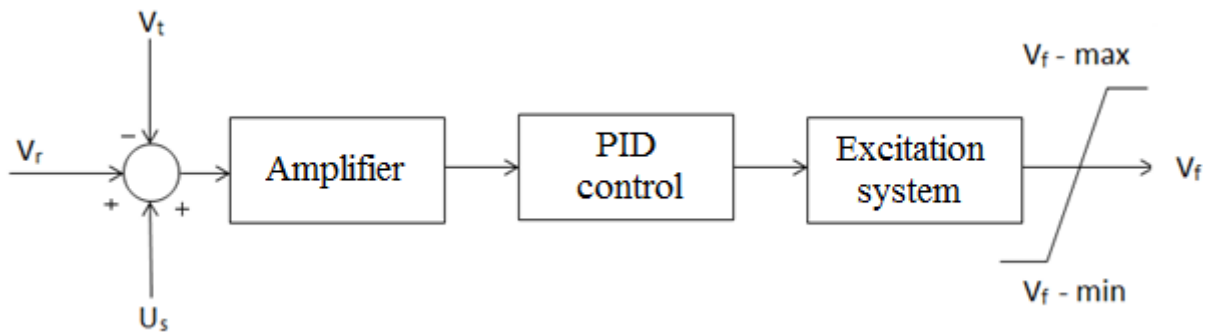


Fig.II.3 : Modèle schématique d'un régulateur AVR

Où :

La grandeur V_r représente la consigne de tension utilisée comme référence qui satisfasse les conditions d'état d'équilibre. Le régulateur de tension compare au départ la valeur de tension de sortie de l'alternateur V_t avec la tension de consigne V_r . Cette différence (erreur) est amplifiée pour donner la tension d'excitation V_f nécessaire pour maintenir l'équilibre souhaité, qui sera limité entre deux valeurs grâce à un système de limitation ($V_{f-\min}$, $V_{f-\max}$).

L'addition d'un signal complémentaire U_s au nœud de sommation peut avoir lieu : c'est un signal de commande appelé stabilisateur de puissance (**PSS**), il permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la vitesse de rotation à l'entrée du régulateur de tension (**AVR**) du générateur, afin de produire un couple au niveau du générateur qui est en phase avec la variation de la vitesse rotorique. Le stabilisateur de puissance (**PSS**) corrige la décroissance du couple d'amortissement et s'oppose à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier rapidement et au bon moment, [6] [11].

Différentes études ont été menées par un groupe IEEE dans le domaine de la modélisation des éléments d'un système de puissance concernant les systèmes d'excitation. Il existe trois types de systèmes d'excitation qui sont fréquemment utilisés, [2] :

- **"The Potential-Source Static Excitation System"**, dans lequel le temps de réponse de la tension d'excitation est très court,
- **"The Separately Excited Static Diode-Rectifier Excitation System"**, qui existe sous deux formes, la première appelée **Nominal Response Excitation System (NRES)** et la seconde appelée **High Initial Response (HIR)**. Le temps de réponse de la tension d'excitation pour la première est compris entre 0,2 et 0,5s, ce qui est beaucoup plus lent que celui du HIR.

- "The Brushless Excitation System" qui a une réponse semblable au deuxième modèle. Cependant, les modèles mathématiques de ces trois types de systèmes d'excitation sont disponibles, à savoir : Type IEEE ST1 pour le premier modèle, type IEEE AC1 est choisi pour le modèle **Brushless Excitation System**, et le type IEEE AC2 pour le modèle **HIR**.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle du système IEEE ST1, car il est le plus utilisé dans la littérature. Ce système se caractérise principalement par sa rapidité dans la réponse et sa sensibilité.

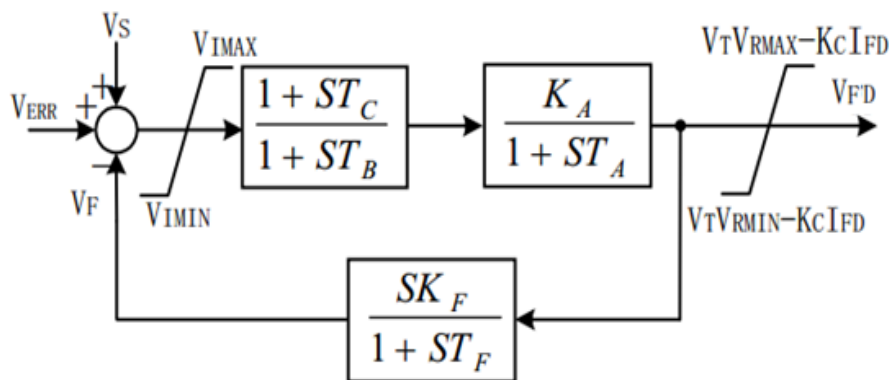


Fig.II.4 : modèle du système d'excitation IEEE-type ST1, [2]

Afin de contrôler la tension d'excitation V_{FD} , Un modèle simplifié dans lequel nous avons négligé les constantes de temps (T_c, T_B, T_F), est représenté comme suit [3]:

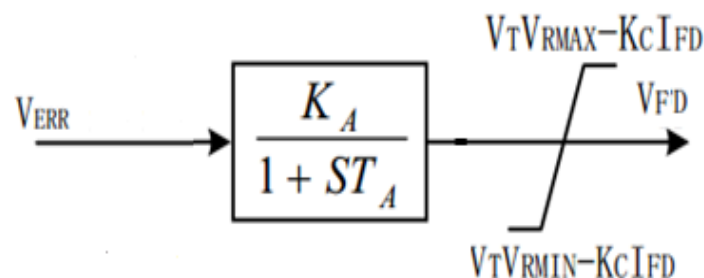


Fig.II.5 : modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1,[3]

Par substitution du modèle simplifié du système d'excitation dans le modèle d'un régulateur automatique de tension, on aboutit au modèle suivant :

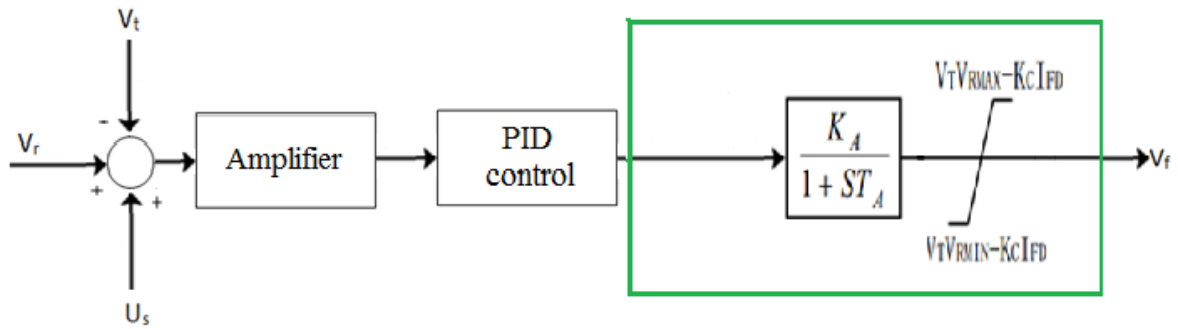


Fig.II.6 : Modèle schématique d'un régulateur AVR

II.4 Régulation de la vitesse de rotation de l'alternateur

Le contrôle de la vitesse de rotation de l'ensemble turbo-alternateur est nécessaire pour assurer la stabilité de la fréquence du réseau à 50 Hz et protéger l'alternateur contre le décrochage. Pour assurer cette régulation, il est nécessaire d'introduire un contrôleur PID, qui a pour tâche principal de maintenir la vitesse de rotation au tour de 3000 tr/min. La boucle de régulation est composée principalement d'un régulateur PID, d'un servomoteur et d'une turbine. La figure suivante montre le principe de régulation de la vitesse :

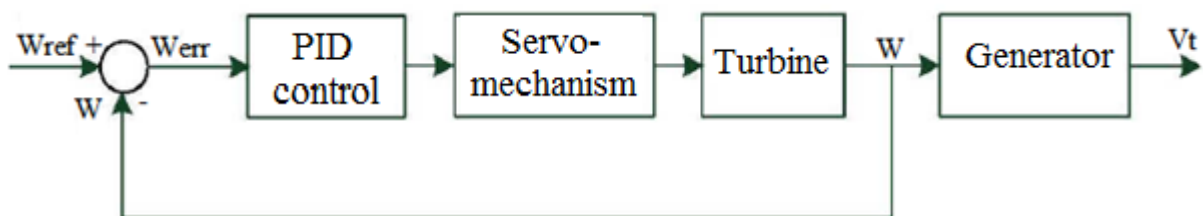


Fig. II.7 : Principe de régulation de la vitesse,

Le régulateur PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale, Il permet aussi d'assurer le bon fonctionnement de la turbine, [8].

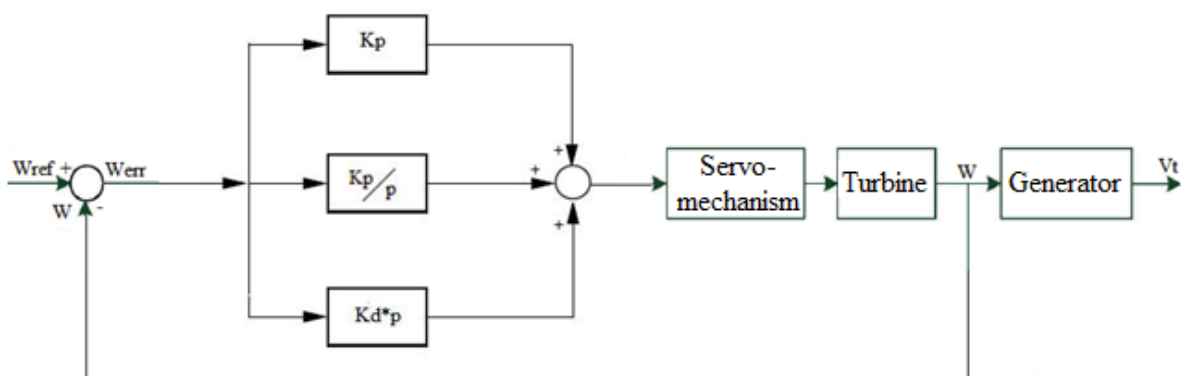


Fig.II.8 : Régulateur PID et servomoteur [7]

II.5 Synthèse des régulateurs

Les régulateurs servent à améliorer les performances intrinsèques d'un système donné, à savoir : sa précision, sa rapidité tout en garantissant sa stabilité pour avoir un bon fonctionnement qui satisfasse le cahier des charges.

Dans cette partie on s'intéresse à synthétiser quelques correcteurs permettant d'obtenir un certain nombre de performances et d'avoir un système bien réglé.

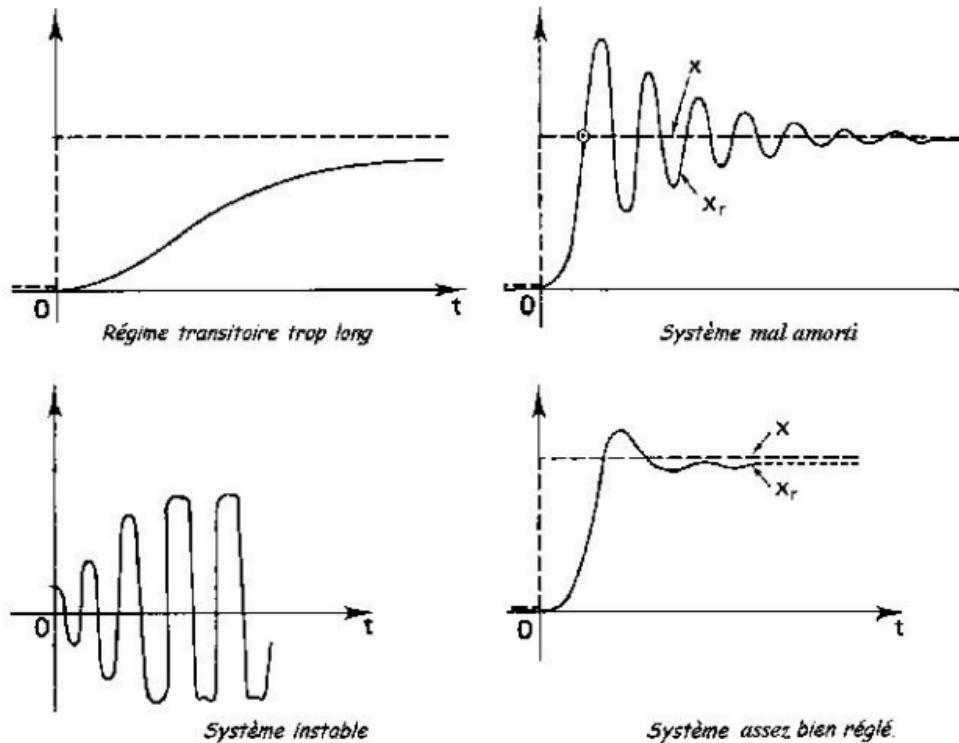


Fig.II.9 : Quelques systèmes à réguler [5]

Correcteur proportionnel (P)

Ce régulateur est le plus classique, il consiste à appliquer une correction en rapport avec la différence instantanée entre la valeur mesurée et celle de référence. Il est défini par un gain K , la sortie du correcteur est donnée par :

$$y(t) = K \cdot \varepsilon(t) \quad (2.1)$$

Où $\varepsilon(t)$ est le signal d'entrée du correcteur et $y(t)$ représente le signal de sortie du correcteur. Sa fonction de transfert est donné par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K \quad (2.2)$$

Cette commande ne permet pas de réaliser de bonnes performances en termes de précision, un faible gain K donne généralement un système stable mais avec une erreur importante, par contre une valeur importante de K donne des mauvaises performances en régime transitoire [5].

Correcteur à action proportionnelle et intégrale (PI)

Ce régulateur est défini par l'équation différentielle suivante :

$$K_p \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_i \varepsilon(t) = \frac{dy(t)}{dt} \tag{2.3}$$

Sa fonction de transfert est donné par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \tag{2.4}$$

Avec $T_i = \frac{K_p}{K_i}$

Ce correcteur représente l'association de deux actions (P et I) qui est représenté par le schéma fonctionnel suivant :

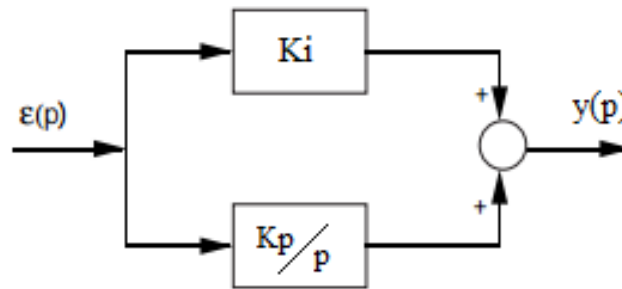


Fig.II.10 : Schéma fonctionnel d'un correcteur PI

La régulation par l'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision du système de contrôle et d'éliminer les perturbations dues à l'application d'un signal de type échelon. Par contre ce type de régulateur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité de système.

Correcteur à action proportionnelle et Dérivé (PD)

Ce régulateur est défini par l'équation différentielle suivante :

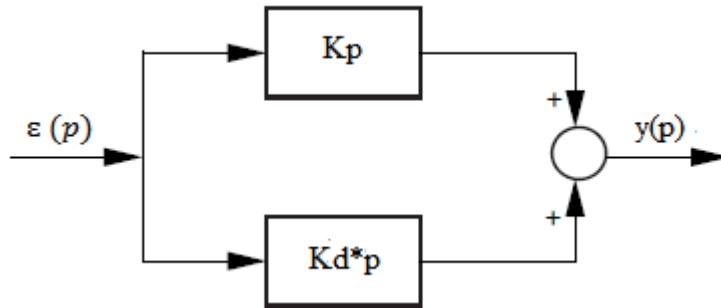
$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{2.5}$$

La fonction de transfert de ce correcteur est donnée par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + K_d p = K_p(1 + T_d) \quad (2.6)$$

Avec $T_d = \frac{K_d}{K_p}$

Ce correcteur représente l'association de deux actions (P et D) qui sont représentés par le schéma fonctionnel suivant :



FigII.11 : Schéma fonctionnel d'un correcteur PD

Ce correcteur introduit un déphasage positif et de ce fait on l'appelle le correcteur à avance de phase qui permet d'améliorer la stabilité et la rapidité du système. Par contre, il présente un certain inconvénient concernant sa sensibilité aux bruits.

Correcteur à action proportionnelle intégrale et Dérivé (PID)

Ce type de correcteur est défini par l'équation différentielle suivante :

$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{ip} p} + T_d p\right) \quad (2.8)$$

Ce correcteur représente l'association de trois actions (P, I, D) qui sont représentées par le schéma fonctionnel suivant :

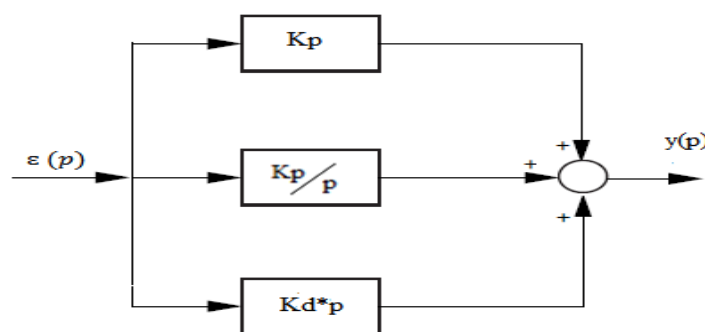


Fig.II .12 : Schéma fonctionnel d'un correcteur PID

Chaque partie du régulateur PID à sa fonction sur le contrôle du système. L'action proportionnelle permet d'augmenter le facteur d'échelle et d'accélérer ainsi la vitesse de réponse. Le rôle de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique. L'action dérivée permet de réduire le temps de dépassement et assurer la stabilité du système, mais il est très sensible à l'interférence à haute fréquence, [4].

Lors de notre étude on a choisi le régulateur de type **PID**, car il présente une bonne régulation de la tension due au avantages qui présente.

Détermination des paramètres de régulateur

Le réglage d'un PID revient à déterminer les valeurs des coefficients K_p, T_i et T_d , qui permettent d'obtenir la réponse souhaitée du procédé, avec les caractéristiques suivante : robustesse, rapidité et précision

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad 2.9$$

Chaque coefficient influe sur la réponse du système de la manière suivante :

K_p : Il influe sur le temps de montée, quand on diminue le temps de montée on obtient un dépassement plus important, avec une erreur statique plus améliorée.

T_i : Il règle la vitesse à laquelle est intégrée l'erreur. Plus T_i est petit, et plus on fait croître rapidement le signal de correction.

T_d : Il règle le temps d'application à chaque « saut » du signal d'erreur,[5].

Détermination des paramètres par la méthode d'approches successives

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. On commence par régler l'action proportionnelle, puis l'action dérivée et ensuite l'intégrale.

Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système, sauf que son caractère itératif cause la difficulté d'utilisation sur des procédés à grande inertie.

La procédure

On commence avec un **K_p** très petit, et on annule les actions D et I. On applique un échelon de consigne, si le gain est suffisamment faible la réponse doit être bien amortie, on augmente

le gain K_p et on applique à nouveau un échelon de consigne et on recommence jusqu'à ce que des dépassements apparaissent sur la sortie. Régler alors K_p à la moitié de la valeur obtenue à l'apparition de dépassements.

On applique la même procédure pour T_i et revenir à 2 fois la valeur provoquant les dépassements. Même chose avec T_d et revenir au tiers de la valeur provoquant dépassements, [5].

Après l'application de la méthode par l'approche successive, les paramètres optimaux qui remplissent les critères de stabilité et rapidité sont les suivants :

Les paramètres du régulateur PID pour la régulation de la tension de sortie obtenus sont :

$$K_p = 200 ; T_i = 0.014s \text{ et } T_d = 0.025 s$$

Les paramètres du régulateur PID pour la régulation de la vitesse de l'ensemble Turbine-alternateur sont :

$$K_p = 20 ; T_i = 0.01 s \text{ et } T_d = 0.013 s$$

Ces résultats sont satisfaisants, car le dépassement au niveau des résultats obtenus est largement amélioré (30 %).

II.6. Schémas blocs et résultats de simulation

La procédure de simulation consiste à associer l'alternateur présenté dans le chapitre I au schéma bloc de régulation de la tension (AVR), **Fig.II.3**, au schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation, **Fig. II.7**, ainsi qu'à leur mise en commun, telle que mentionnée dans la **Fig.II.13**.

Ce système permet d'avoir une idée sur le comportement des grandeurs de la machine, telles que les tensions de sortie (**Va, Vb, Vc**), les courants (**Ia, Ib, Ic**), la vitesse de rotation (ω_r) et l'angle interne (**δ**).

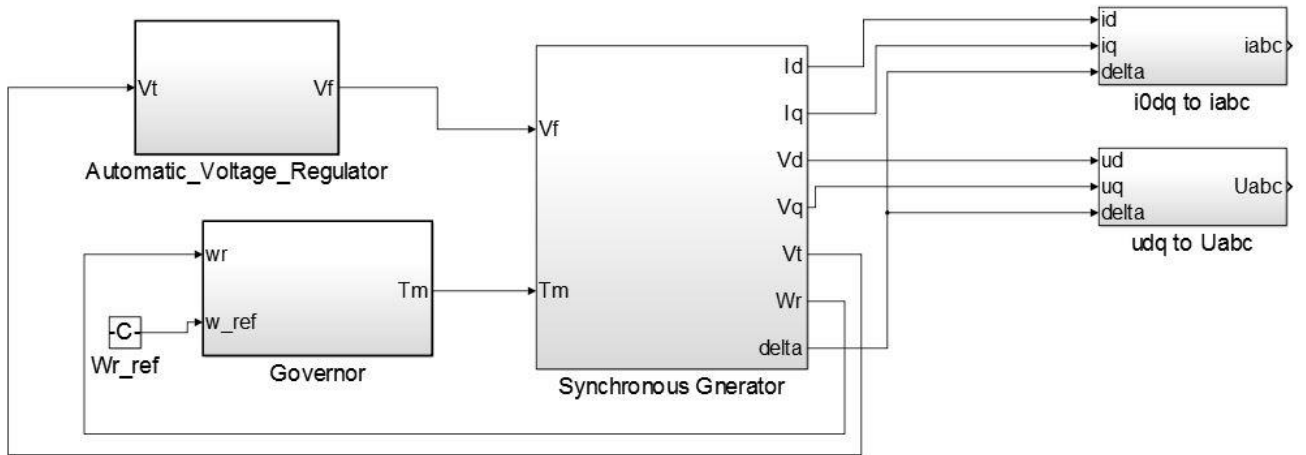


Fig.II.13 : Structure combinée de la génératrice et les blocs de régulation sous Simulink

Le schéma bloc de régulation de la tension de sortie sous Matlab/Simulink est :

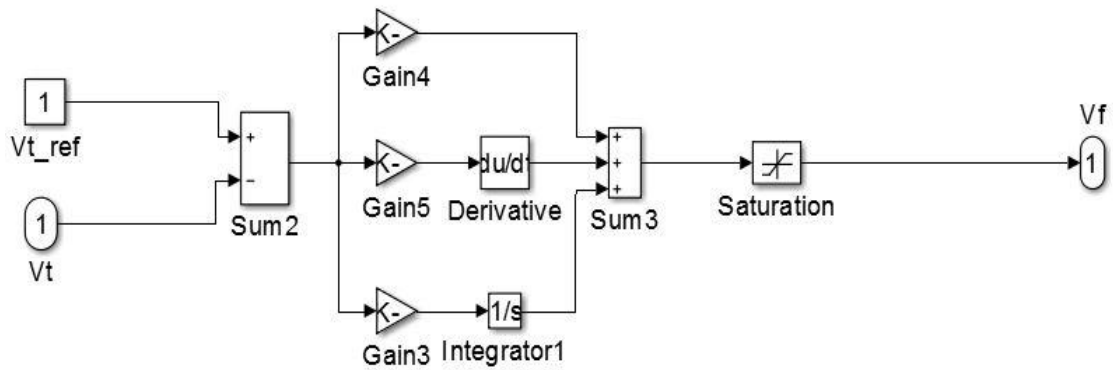


Fig.II.14 : Structure du régulateur de tension de sortie sous Simulink

Le schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation sous Matlab/Simulink est :

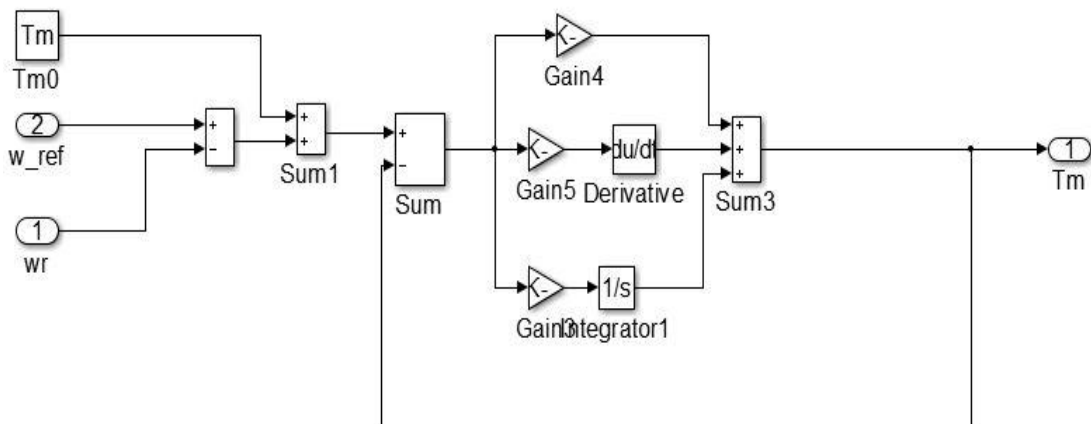


Fig.II.15 : Structure du régulateur de la vitesse (Wr) sous Simulink

II.7. Résultats de simulation

- Tests sur l'alternateur subissant une perturbation de charge à l'instant $t=2s$

Nous obtenons sur la Fig.II.18 les courants des trois phases ainsi que la vitesse et la tension de sortie de l'alternateur sur la Fig.II.19.

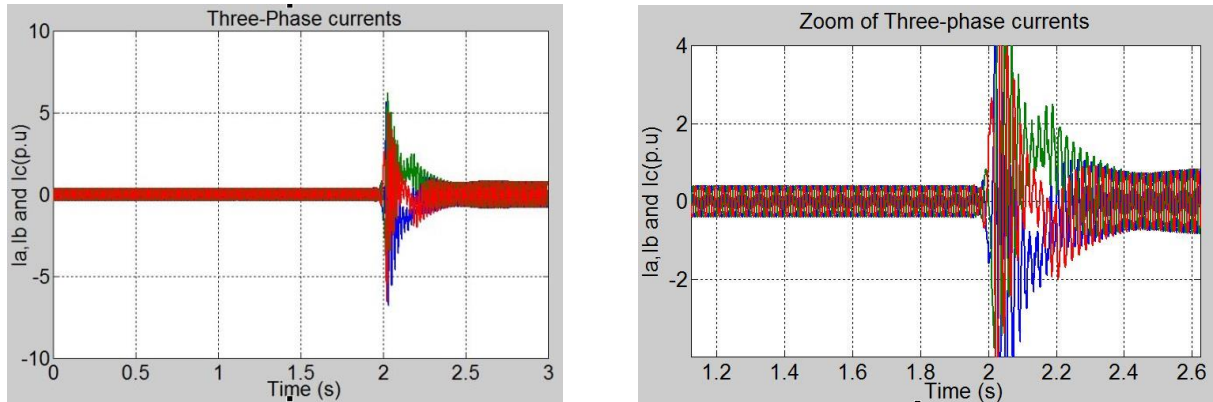
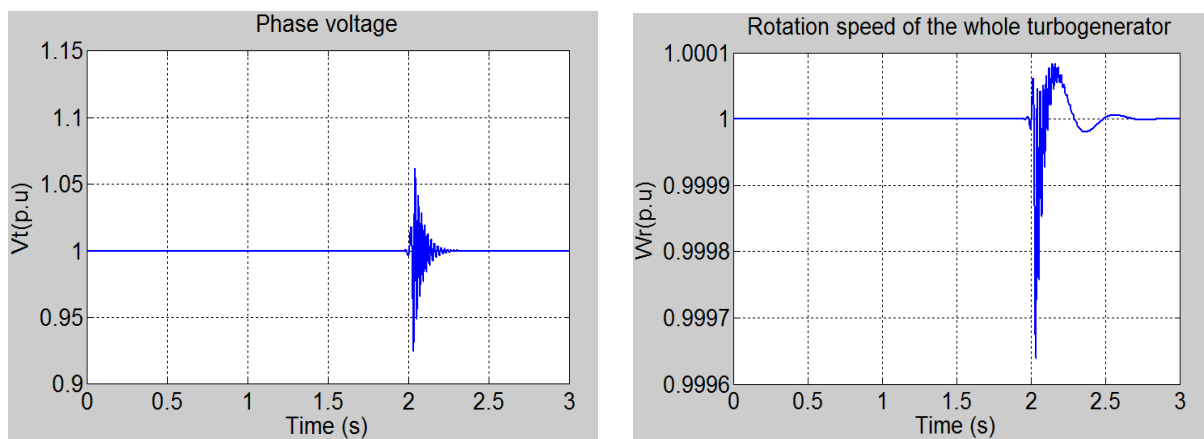


Fig.II.18 : Courants des trois phases à $t=2s$



FigII.19 : Tension de sortie (V_t) et Vitesse (ω_r) de l'alternateur à $t=2s$

Interprétation des résultats

La perturbation de charge provoque une variation de la tension. Cette variation est supprimée rapidement à l'aide du système de régulation (AVR). Il en est de même pour la vitesse. Le temps de rétablissement vers les valeurs nominales est de l'ordre de 0.2s pour la tension, et de 0.5s pour la vitesse.

- *Angle interne(δ) et glissement de l'alternateur*

Nous présentons sur les Figs.4.20 l'angle interne ainsi que le glissement de l'alternateur à une perturbation à l'instant $t=2s$. L'angle interne prend une nouvelle valeur, cette valeur est atteinte après une perturbation provoqué par le système de régulation de vitesse qui dure 0.8 s. Le glissement subit des perturbations pendant la période de régulation (transitoire) et revient à sa valeur nulle.

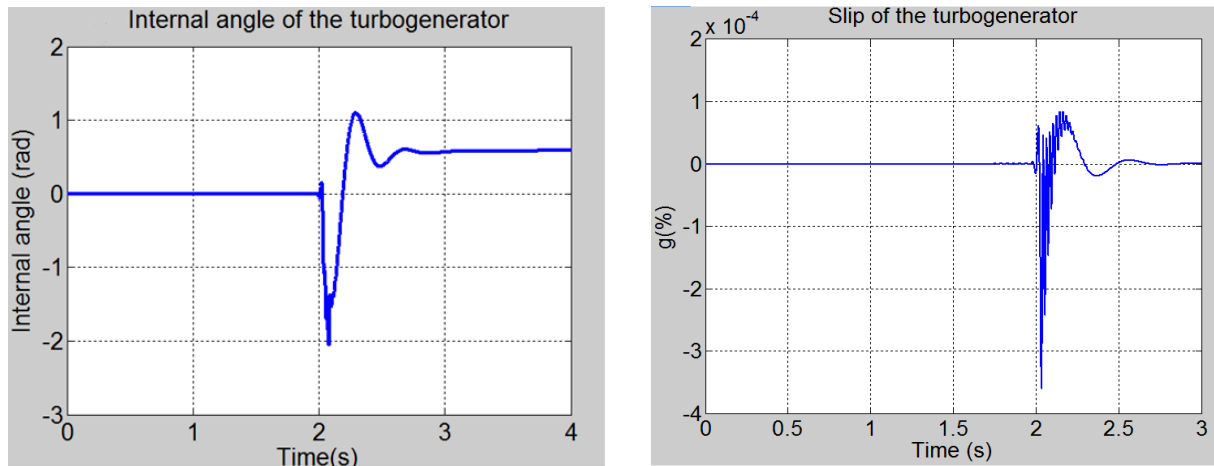


Fig.4.20 : Angle interne (δ) et glissement de l'alternateur à $t=2s$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons illustré les résultats essentiels obtenus à partir du fonctionnement attendu du modèle global, dont lequel on s'est intéressé à l'étude des systèmes de régulation et de contrôle robustes des générateurs synchrones, pour l'amélioration de la tension de sortie et de la vitesse de rotation de l'alternateur.

Nous avons développé un modèle du système d'excitation de type Std.1 avec tous ses éléments, en se basant sur le modèle de référence établi par IEEE Std. 1A. Nous avons appliqué une régulation de la tension en utilisant un régulateur automatique appelé AVR, au niveau du système d'excitation. Un système de régulation PID permettant de réguler la vitesse de rotation de l'alternateur a été également réalisé.

Enfin, nous avons mis au point un modèle global pour la simulation des performances dynamiques qui assemble les trois principaux schémas blocs essentiels du groupe turbine-alternateur sous forme de schémas blocs Matlab/Simulink.

Conclusion générale

Lors de mon mémoire, j'ai été particulièrement intéressé par les alternateurs de grande puissance. Le modèle de l'alternateur est basé sur les équations électriques et mécaniques de système. Ce qui m'a permis d'élaborer une synthèse pour les régulateurs afin de réguler la tension de sortie et la vitesse de rotation de l'alternateur. Ensuite, ce modèle a été implémenté sous Matlab/Simulink.

Notons, cependant, que mon étude a été effectuée en se basant sur les valeurs nominales données par le constructeur. Les résultats obtenus à partir du modèle global sont très satisfaisants. On peut donc dire que les objectifs finaux de mon étude sont atteints et qui peuvent être résumés comme suit :

- Développement d'un modèle du groupe turbine-alternateur pouvant être implémenté sous MATLAB/Simulink.
- Développement d'un modèle d'état de l'excitatrice en se basant sur le modèle de référence établi sur IEEE-Std. 1A.
- Régulation de la vitesse à partir d'un modèle idéal de la turbine.
- Régulation de la tension par AVR au niveau du système d'excitation statique sur IEEE-Std.1A.

-
- [1] J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier, 'Introduction à l'électrotechnique approfondie' Technique and documentation, Paris, 1981.
- [2] John R.Smith, 'Response Analysis of A.C.Electrical Mahines', Computer Models and Simulation', Research Studies Press Ltd, 1990
- [3] Emile Mouni *,Slim Tnani , Gérard Champenois,' Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method', Simulation Modelling Practice and Theory 16 (2008), pp 678 –689.
- [4] Rachid ABDESSEMED, 'Modélisation et simulation des machines électriques', Ellipses Technosup,Mai 2011,pp 115-121
- [5] F. Bruck, F. Himmelstoss,'Modelling and simulation of synchronous machine, in: IEEE Computers in Power Electronics, 6th Workshop on 19–22 July, 1998, pp. 81–86.
- [6] E. Mouni, S. Tnani, G. Champenois,'Comparative study of three models methods of synchronous generator', in: Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris, France, 2006.
- [7] P. Subramaniam, O.P. Malik, 'Digital simulation of a synchronous generator in direct phase quantities', Proc. IEE 118 , january 1971 ,pp153–160.
- [8] 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, Feb. 1992, pp 167 - 179.
- [9] IEEE committee report,' Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies', [IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems](https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293570), DOI: [10.1109/TPAS.1973.293570](https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293570) 1973, Vol.PAS-92, N°6, Pages: 1904 - 1915,
- [10] Boonserm Changaroon, Suresh Chandra Srivastava, and Dhadbanjan Thukaram' A Neural Network Based Power System Stabilizer Suitable for On-Line Training—A Practical Case Study for EGAT System', IEEE transactions on energy conversion, Vol. 15, N°. 1, March 2000.
- [11] A.L. Elshafei*, K.A. El-Metwally, A.A. Shaltout,' A variable-structure adaptive fuzzy-logic stabilizer for single and multi-machine power systems', Control Engineering Practice 13 (2005), Elsevier Ltd, pp 413–42