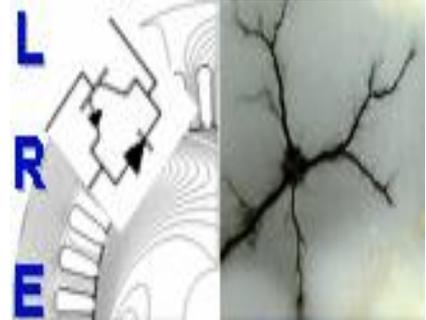


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

**Calcul, identification des paramètres et modélisation d'un
alternateur**

Présenté par
Said BENSEBAA

Sous la direction de **Pr. O. Touhami**
soutenu publiquement le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président :	A. Hellal, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	R. Ibtouen, Professeur à l'ENP
Examineur :	A. Mekhaldi, 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 حساب وتحديد الإعدادات ثم نمذجة المولد. إعدادات المولد مهمة جدا، فهي تسمح بإعطاء فكرة عن ديناميكية و سلوك النظام. لقد قمنا بتقديم نموذج كامل انطلاقا من المعادلات الكهربائية والميكانيكية لطاقت المولد قد تم. هذا النموذج، والذي يسمح بإعطاء فكرة عن سلوك أحجام مخارج المولد، وهي: الفولتية الانتاج والتيارات وسرعة دوران تمثيله بواسطة برنامج Matlab / Simulink

كلمات مفتاحية: Matlab / Simulink, مولد , نموذج

Abstract

The study presented in this thesis focuses on the identification of parameters, modeling and calculating an alternator. The operating parameters of a synchronous generator are very important, they allow a study in dynamic mode to analyze system behavior . A complete model of the generator has been developed. It is based on the electrical and mechanical equations of the entire system in order to analyze the variation of the various quantities of the generator, namely: the output voltages, currents and the rotational speed. This model was implemented on Matlab/Simulink.

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

Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur l'identification des paramètres, la modélisation et le calcul d'un alternateur. Les paramètres de fonctionnement d'un alternateur synchrone sont très importants, ils permettent d'effectuer une étude en régime dynamique afin d'analyser le comportement du système. Un modèle complet de l'alternateur a donc été élaboré. Il est basé sur les équations électriques et mécaniques de l'ensemble du système en vue d'analyser la variation des différentes grandeurs de l'alternateur, à savoir : les tensions de sorties, les courants et la vitesse de rotation. Ce modèle a été implémenté sur Matlab/Simulink.

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

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien et tous ses sacrifices, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. Merci pour tout, ma mère chérie je t'aime.

Mon père, le Monsieur avec qui j'ai jamais manqué de quoi que ce soit, sans ses précieux conseils je ne serais jamais arrivé à ce stade, il a toujours été là pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi, que Dieu puisse te garder pour moi cher papa.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mon meilleur ami Amine ZAMOUCHE, je n'oublierais jamais les bons moments qu'on a passé ensemble. Je remercie Dieu de m'avoir donné un tel ami. Toute la famille BENSEBAA et BEZGHOUD

Mes professeurs de l'ENP qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

BENSEBAA Said

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

Nous remercions vivement, **Mr R.Ibtiouen**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui a accepté d'être mon rapporteur, et surtout pour son aide à propos des observations concernant le travail effectué. J'ai l'honneur d'avoir un professeur de telle qualité qui m'a toujours encouragés durant mon projet. Je le remercie sincèrement pour le soutien et la confiance qu'il m'a accordée tout le long de mon projet.

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

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

SOMMAIRE

Introduction générale.....	(11)
----------------------------	------

Chapitre I : Calcul et identification des paramètres d'un alternateur

I.1 Introduction.....	(13)
I.2 Essai de court-circuit brusque.....	(13)
I.3 Essai à vide de l'alternateur	(16)
I.4 Mesure en courant continu	(16)
I.5 Mesure en courant alternatif.....	(17)
I.6 Essais indiciels de la machine synchrone (essai d'attaque de l'inducteur).....	(17)
I.7 Détermination des réactances transitoires et sub-transitoires à partir du tracé des caractéristiques de réponse en fréquence.....	(18)
I.8 Conclusion.....	(23)

Chapitre II : Modélisation de l'alternateur

II.1 Introduction.....	(25)
II.2 Modèle mathématique de l'alternateur.....	(25)
II.3 Passage du référentiel d'axes (abc) au référentiel de Park	(27)
II.4 Blocs Simulink	(32)
II.5 Conclusion.....	(37)
Conclusion générale.....	(39)
Bibliographie.....	(41)

Liste des figures

I.1. Courant de phase de court-circuit.....(14)

I.2. Approche de la caractéristique de court-circuit triphasé brusque.....(15)

I.3. Caractéristiques à vide.....(16)

I. 4. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l’axe direct.....(19)

I. 5. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l’axe direct.....(20)

I. 6. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l’axe quadrature.....(21)

I. 7. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l’axe quadrature.....(21)

II.1. Schéma équivalent de la machine synchrone munie d’amortisseurs.....(25)

II.2. Modèle de la machine synchrone dans le repère (dqo)(30)

II.3. Réalisation du modèle de l’alternateur à vide sous environnement Simulink.....(33)

II. 4. Modèle simplifié de l’alternateur.....(33)

II.5. Tension de sortie de l’alternateur à vide(34)

II.6. Vitesse de rotation à vide(34)

II.7. Les courants I_f , I_D et I_Q (35)

II.8. Modèle de l’alternateur en charge sous Simulink(35)

II.9. Bloc-Simulink du couple électromagnétique.....(36)

II.10. Courants des trois phases statoriques(36)

II.11. Vitesse de rotation en charge.....(37)

Liste des symboles

r_a	La résistance d'enroulement statorique.
r_f	La résistance d'excitation.
r_D, r_Q	La résistance de l'enroulement amortisseur sur l'axe d et q respectivement.
X_a	La réactance de fuite par phase d'enroulement statorique.
X_f	La réactance de fuite d'enroulement d'excitation.
X_D, X_Q	La réactance d'enroulement -amortisseur sur l'axe d et q respectivement.
X_{ad}, X_{aq}	La réactance mutuelle magnétisante sur l'axe d et q de l'alternateur respectivement.
X_d, X_q	Réactances synchrones respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$X'd, X'q$	Réactances transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$X''d, X''q$	Réactances sub_transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$T'd_0, T'q_0$	Constantes de temps transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$T''d_0, T''q_0$	Constantes de temps sub_transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$T'd, T'q$	Constantes de temps transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
$T''d, T''q$	Constantes de temps sub_transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T_{kd}	La constante de temps sub_transitoire du circuit inducteur.
$V_{a,b,c}$	Les Tensions des phases a,b,c respectivement.
$\Psi_{a,b,c}$	Les flux magnétiques des trois enroulement statorique a,b,c respectivement.

Liste des symboles

$i_{a,b,c}$	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.
$M_{df}, M_{Dd}, M_{fD},$	Mutuelle inductance d'axe direct.
$M_{Qq},$	Mutuelle inductance d'axe quadrature.
V_r	La tension de référence
V_t	Tension de la sortie de l'alternateur

INTRODUCTION GENERALE

La machine synchrone est un dispositif électromagnétique qui permet de produire de l'énergie électrique par conversion de l'énergie mécanique.

La modélisation d'un système réel est sa représentation par un modèle mathématique. Elle permet d'une part de restituer une image du système observable et d'autre part de prévoir son comportement dynamique. Elle aide à l'analyse et à la prévision de l'exploitation du système réel. Ainsi, la modélisation de la machine synchrone est une phase primordiale afin d'avoir une idée sur le comportement des différentes grandeurs de sortie et de prévoir son fonctionnement.

Les paramètres électriques de la machine doivent être suffisamment précis et fiables car ils permettent d'obtenir un modèle numérique ayant une réponse identique au modèle réel. Différentes techniques de mesures et de procédures d'estimation sont utilisées pour la détermination de ces paramètres.

On effectue les mesures directes des paramètres, en régime permanent, afin de déterminer la résistance de l'induit R_a , celle de l'inducteur R_f , l'inductance directe L_d , l'inductance quadrature L_q et l'inductance mutuelle M_f .

Les mesures effectuées en régimes transitoires permettent d'obtenir les paramètres dynamiques. On distingue deux types d'essais : les essais de court-circuit en marche et les essais statiques appliqués à la machine au repos. La procédure d'estimation des paramètres à l'aide de l'essai en court-circuit est connue comme une méthode dynamique qui utilise la technique de la construction graphique d'enveloppes et de tangentes.

CHAPITRE I

Calcul et identification des paramètres

I.1 Introduction

Les paramètres de fonctionnement d'un alternateur synchrone sont très importants. Ils permettent d'effectuer une étude en régime dynamique afin de prévoir le comportement du système. Ils peuvent être calculés ou estimés à partir des mesures provenant du système physique. Les essais de court-circuit sont utilisés pour estimer un nombre important de paramètres de la machine synchrone.

Cependant ces paramètres peuvent être obtenus à partir des paramètres standards de l'alternateur synchrone ($X_d, X'_d, X''_d, X_q, X'_q, X''_q$) et ($T'_{d0}, T''_{d0}, T'_d, T''_d, T'_{q0}, T''_{q0}, T'_q, T''_q$), avec lesquels on peut connaître le fonctionnement et le comportement d'un générateur, tel que :

- X_d, X_q Réactances synchrones respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- X'_d, X'_q Réactances transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- X''_d, X''_q Réactances sub-transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T'_{d0}, T'_{q0} Constantes de temps transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T''_{d0}, T''_{q0} Constantes de temps sub-transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T'_d, T'_q Constantes de temps transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T''_d, T''_q Constantes de temps sub-transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature

I.2 Essai de court-circuit brusque

Le courant est obtenu par l'application d'un court-circuit aux bornes des phases statoriques quand la machine fonctionne à vide. On relève l'évolution des courants de la machine en fonction du temps. Cet essai est utilisé pour déterminer les paramètres dynamiques de la machine qui sont les constantes de temps et les réactances transitoires et sub-transitoires.

Le courant de court-circuit dans la phase A de la machine synchrone munie d'amortisseurs est donné par l'expression suivante [1], [2] :

$$I_a = V\sqrt{2} * \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d}}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d}}} \right] \cos(\omega t) + V * e^{-\frac{t}{T_a}} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega t) \right) \quad (1.1)$$

La Figure .I.1 donne l'allure du courant de court-circuit dans une phase.

L'expression du courant de court-circuit est la somme de cinq termes qu'on peut regrouper en trois composantes :

- la composante alternative fondamentale de pulsation ω_r .
- une composante asymétrique de terme apériodique.
- une composante du second harmonique de pulsation $2\omega_r$.

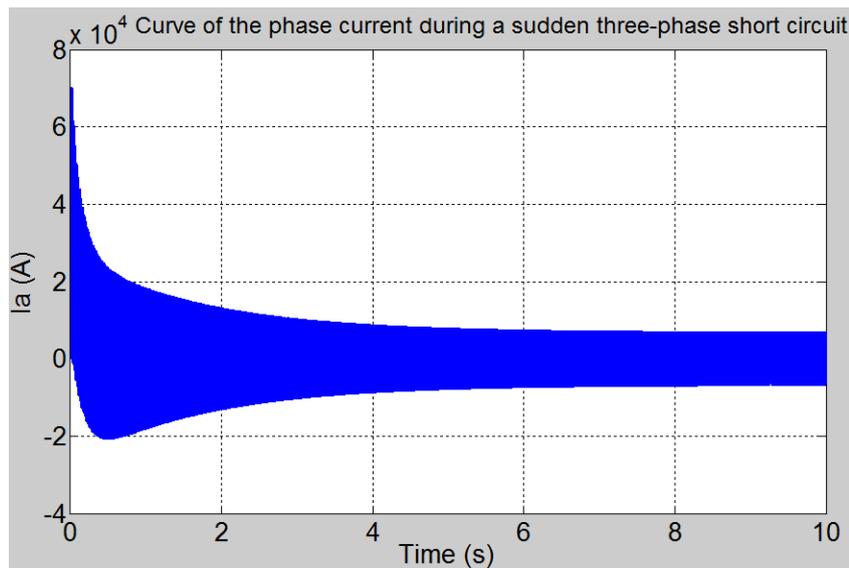


Fig.I.1. Courant de phase de court-circuit

I. 2. 1. Interprétation des résultats

On remarque que l'amplitude des ondes successives décroît très rapidement pendant les premières périodes. Cela est due à la constante de temps sub-transitoire. Ensuite elle décroît plus lentement. Cela est due à la constante de temps transitoire qui tend à la fin vers une valeur constante (composante alternative).

I. 2. 2. Paramètres à déterminer avec l'essai de court-circuit brusque

L'essai de court-circuit brusque permet de déterminer les paramètres intervenant en régime transitoire. L'inducteur est excité sous une tension continue faible, le stator est ouvert et la tension mesurée à ses bornes est E_0 . Quand on court-circuite brusquement les trois phases on enregistre l'évolution du courant comme le montre la Fig. 1. Cette dernière courbe peut être schématisée par le tracé de deux tangentes comme cela est représenté dans la Fig. 2.

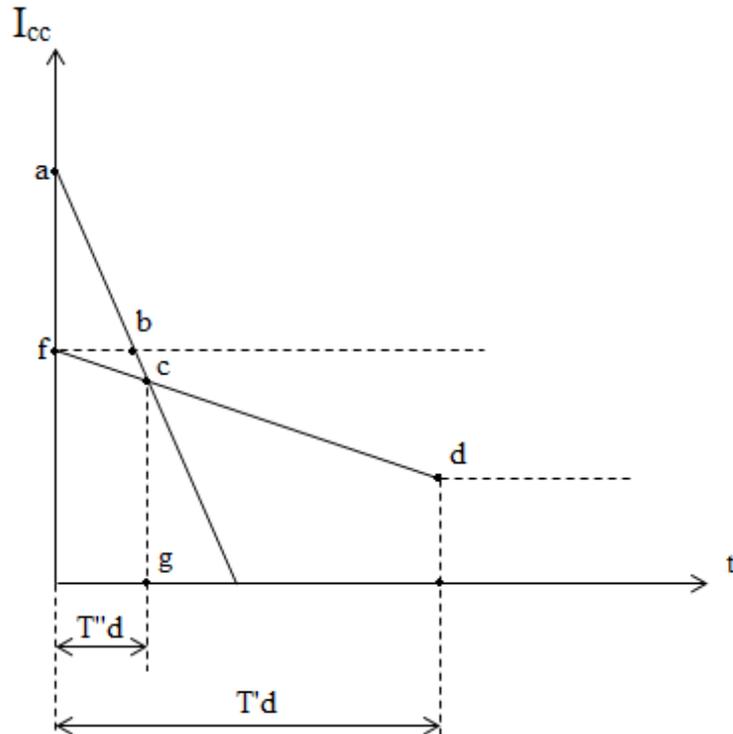


Fig. I.2 .Approche de la caractéristique de court-circuit triphasé brusque

- la courbe réelle du courant de court-circuit passe les points a, b, c et d.
- la partie « ab » représente le régime sub-transitoire.
- la partie « cd » représente le régime transitoire.

À partir de ce tracé, on déduit les valeurs des réactances synchrones, transitoires et sub_transitoire tel que

$$- X_d = \frac{E_0}{I_a(\infty)} \quad (1.2)$$

$$- X'_d = \frac{E_0}{I_{of}} \quad (1.3)$$

$$- X''_d = \frac{E_0}{I_a(\infty)} \quad (1.4)$$

Où : $I_a(0) = oa$ et $I_a(\infty) = de$

Ainsi, on déduit du courant de court-circuit les constantes de temps suivantes :

$T'_d = [oe]$ et $T''_d = [og]$

I.3 Essai à vide de l'alternateur

A partir de cet essai, on peut déterminer la mutuelle inductance M_f entre le stator et l'inducteur. Au départ on entraîne la machine à la vitesse de synchronisme puis on relève la caractéristique de magnétisation $E_v=f(I_f)$ de l'alternateur.

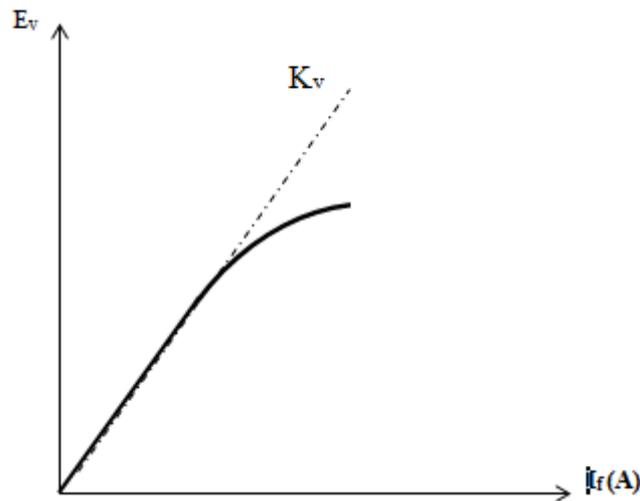


Fig.I.3 .Caractéristiques à vide

Généralement les modèles mathématiques élaborés pour les machines électriques ne tiennent pas compte de la saturation, de ce fait on peut écrire :

$$M_f = \frac{K_v}{\omega_s}$$

où (ω_s) représente la vitesse de synchronisme et où (K_v) représente la pente de la partie linéaire de la caractéristique à vide.

I. 4. Mesure en courant continu

Cette mesure nous permet d'avoir les résistances des enroulements accessibles à la mesure (résistance d'une phase de stator R_S et résistance du circuit inducteur R_f). Pour cela on injecte un courant continu nominal dans un enroulement puis on mesure la tension à ses bornes

(montage aval). On doit faire une mesure à température ambiante et lorsque le moteur a atteint sa température d'équilibre.

I. 5 Mesure en courant alternatif

La mesure en courant alternatif nous permet d'obtenir la valeur de l'inductance de l'inducteur par utilisation de l'équation suivante :

$$L_f = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_f^2}$$

I. 6 Essais indiciels de la machine synchrone (essai d'attaque de l'inducteur)

On garde l'induit ouvert puis on applique à $t = 0$ une tension continue E à l'inducteur et on enregistre le courant dans celui-ci. Le calcul opérationnel donne

$$\begin{cases} \frac{E}{p} = R_f * I_f + L_f * p * I_f + M_{fd} * p * I_{kd} \\ 0 = R_{kd} * I_{kd} + L_{fd} * p * I_{kd} + M_{fd} * p * I_f \end{cases}$$

En éliminant I_{kd} du système précédent on obtient :

$$I_f = \frac{C_1 * (p + C_2)}{p * (p + C_3)(p + C_4)}$$

Ce qui conduit à une solution dans le domaine temporel :

$$I_f(t) = K_0 - K_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - K_2 e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Du relevé $I_f(t)$ on détermine coefficients : K_0, K_1, K_2, T_1 et T_2 , on aura :

$$R_f = \frac{E}{K_0} \qquad L_f = T_1 * R_f * \frac{1 + \frac{K_2 T_2}{K_1 T_1}}{1 + \frac{K_2}{K_1}}$$

Les constantes de temps sont :

$$\begin{cases} T_f = \frac{L_f}{R_f} \\ T_{kd} = \frac{L_{kd}}{R_{kd}} = T_1 * \frac{\frac{K_2}{K_1} + \frac{T_2}{T_1}}{1 + \frac{K_2}{K_1}} \end{cases}$$

I. 7. Détermination des réactances transitoires et sub-transitoires à partir des caractéristiques de réponse en fréquence

Pour le tracé de la caractéristique de réponse en fréquence sur le plan Gaussien, nous avons besoin de la fonction de transfert de la réactance opérationnelle qui s'écrit sous la forme suivante:

- Selon l'axe direct :

$$X_d(p) = X_d * \frac{(1 + p * T' d)(1 + p * T'' d)}{(1 + p * T' d_0)(1 + p * T'' d_0)}$$

- Selon l'axe quadrature :

$$X_q(p) = X_q * \frac{(1 + p * T' q)(1 + p * T'' q)}{(1 + p * T' q_0)(1 + p * T'' q_0)}$$

Le tracé des caractéristiques de réponses en fréquence est donné par la partie imaginaire de l'admittance opérationnelle en fonction de la partie réelle de l'admittance opérationnelle [3] :

- Selon l'axe direct

$$\text{Imag} \left(\frac{1}{X_d(j\omega)} \right) = f \left(\text{Re} \left(\frac{1}{X_d(j\omega)} \right) \right)$$

- Selon l'axe quadrature

$$\text{Imag} \left(\frac{1}{X_q(j\omega)} \right) = f \left(\text{Re} \left(\frac{1}{X_q(j\omega)} \right) \right)$$

Les constantes de temps transitoires et sub-transitoires nécessaires pour effectuer les tracés des caractéristiques de réponse en fréquence sont les suivantes :

- **à vide**

Axe direct

$$T' d_0 = 6.9$$

$$T'' d_0 = 0.042$$

Axe quadrature

$$T' q_0 = 0.64$$

$$T'' q_0 = 0.076$$

- en court-circuit

$$T'd=1.69$$

$$T'q=0.15$$

$$T''d=0.03$$

$$T''q=0.031$$

Les réactances synchrones :

Axe direct

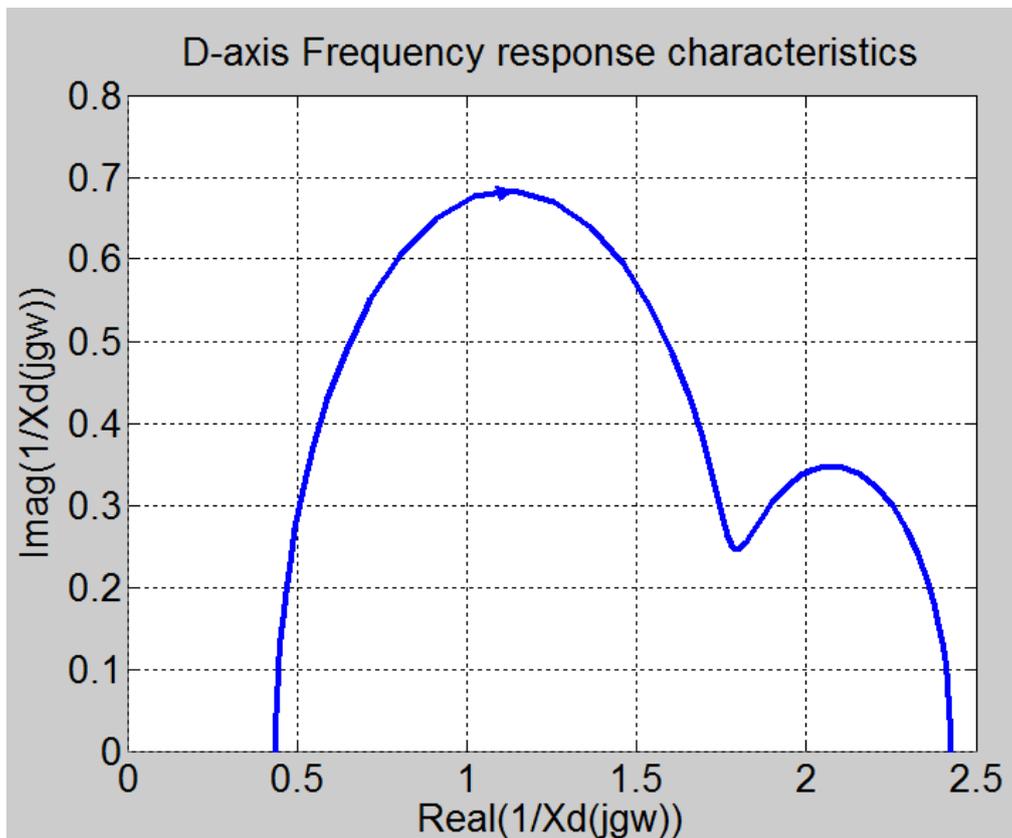
Axe quadrature

$$X_d=2.28$$

$$X_q=2.19$$

1. Axe direct

Le tracé des caractéristiques de réponse en fréquence est donné par les Figs. 4 et 5 :



Figs.I. 4. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct

Pour obtenir la réactance transitoire ($X'd$), il est nécessaire d'utiliser la méthode de séparation des dynamiques. Cette méthode permet de séparer les deux dynamiques transitoire et sub-transitoire par l'utilisation de la relation suivante [3] :

$$Xd(p) = Xd * \frac{(1+p*T'd)}{(1+p*T'd0)}$$

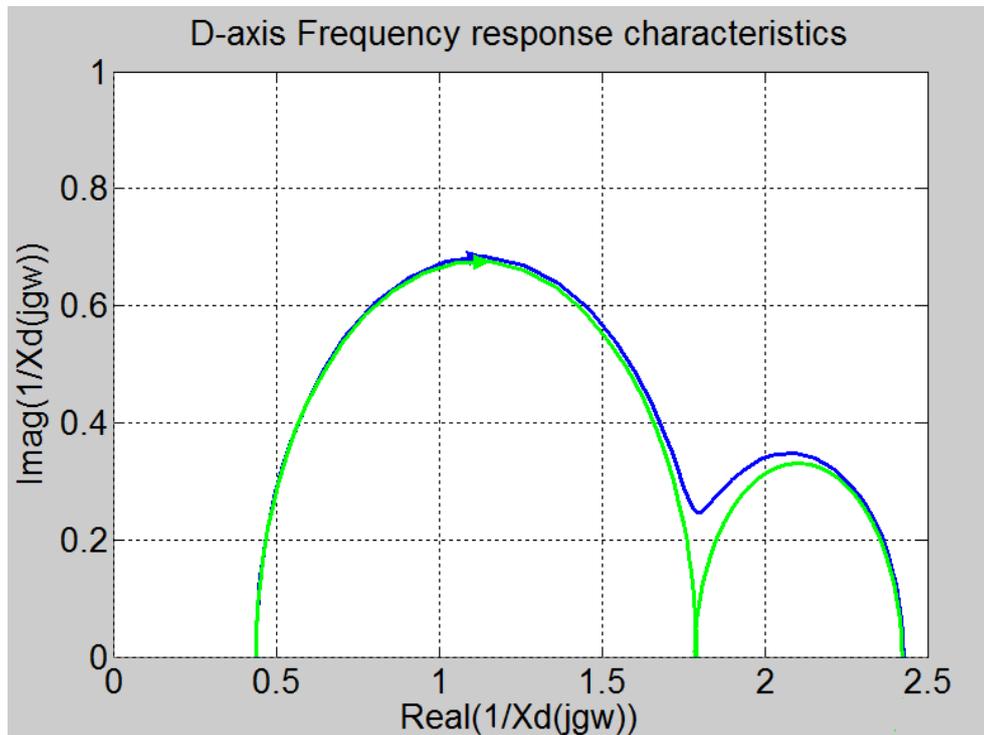


Fig. I. 5. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct

Interprétation des résultats

Pour déduire les valeurs des réactances d'axe direct à partir des Figs.I. 4 et I. 5, on utilise les points d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses ($Y = 0$) puis on calcule leurs inverses. Finalement, pour le cas étudié, on obtient les valeurs suivantes :

$$\frac{1}{X_d} = 0.4386 , \text{ d'où } X_d=2.2799.$$

$$\frac{1}{X'd} = 1.791 , \text{ d'où } X'd=0.5583.$$

$$\frac{1}{X''d} = 2.426 , \text{ d'où } X''d=0.4122.$$

2. Axe quadrature

De même, qu'à partir de la caractéristique de réponse en fréquence d'axe de quadrature, on détermine la réactance synchrone(X_q), et la réactance sub-transitoire (X''_q), mais pour déterminer la réactance transitoire (X'_q), il est nécessaire de faire la séparation des

dynamiques, c'est-à-dire séparer les deux dynamiques transitoire et sub-transitoire, en utilisant l'équation suivante :

$$Xq(p) = Xq * \frac{(1 + p * T'q)}{(1 + p * T'q0)}$$

Les figures.I.6 et I.7 donnent ces représentations. Cependant, on remarque bien la réactance transitoire d'axe quadrature fausse complètement l'allure de ces caractéristiques.

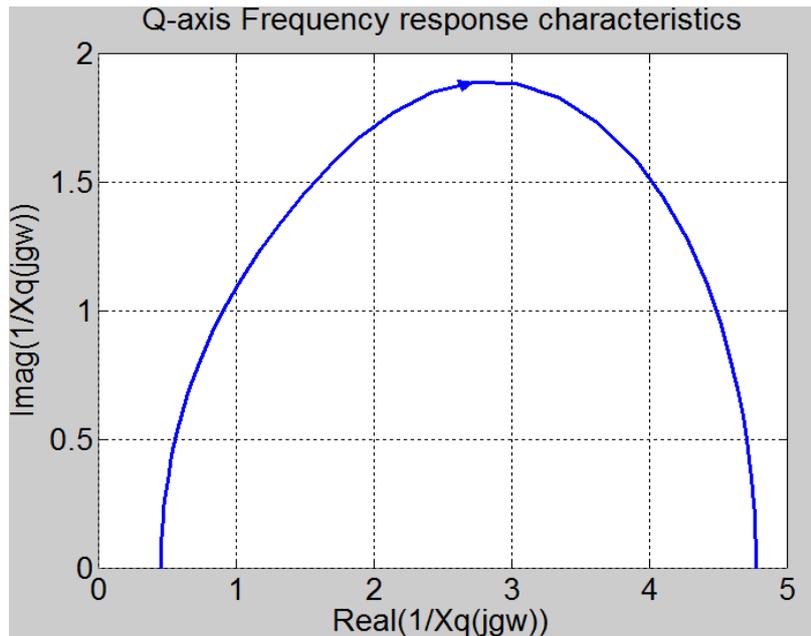


Fig. I. 6. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature

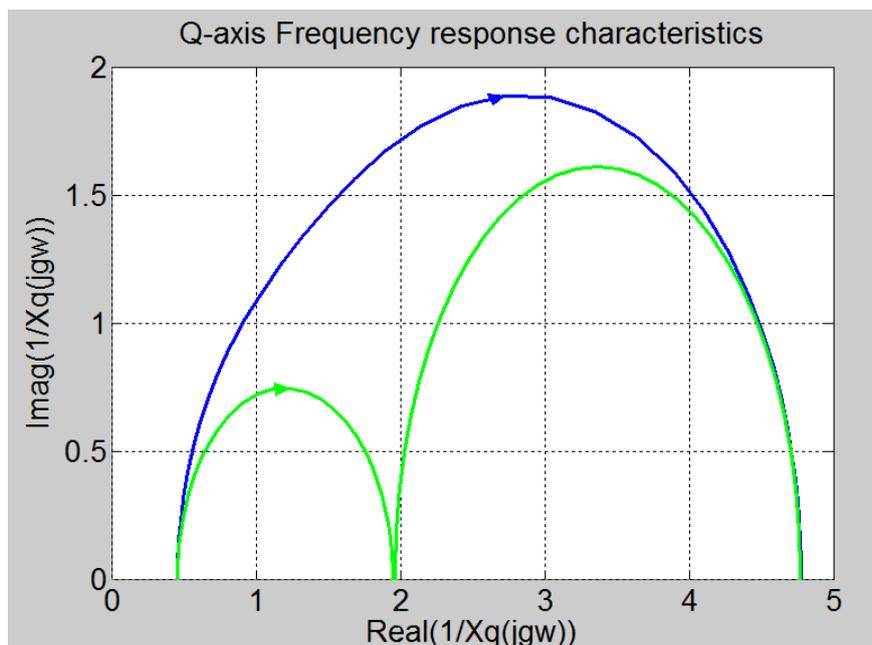


Fig. I. 7. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature

Interprétation des résultats

De la même manière, pour déduire les valeurs des réactances d'axe quadrature à partir des Figs. I.7 et I. 8, on utilise les points d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses ($Y = 0$), on calcule leurs inverse et finalement on obtient les valeurs suivantes :

$$\frac{1}{X_q} = 0.4566, \text{ d'où } X_q = 2.1901.$$

$$\frac{1}{X'_q} = 1.948, \text{ d'où } X'_q = 0.5133$$

$$\frac{1}{X''_q} = 4.776, \text{ d'où } X''_q = 0.209.$$

Tableau 1. Grandeurs caractéristiques de la machine

Grandeurs Physiques	axe longitudinal d	axe transversal q
Réactances transitoires et subtransitoires	$X'_d \approx X_d \cdot \frac{T'_d}{T'_{do}}$ $X''_d \approx X_d \cdot \frac{T'_d \cdot T''_d}{T'_{do} \cdot T''_{do}}$	$X''_q \approx X_q \cdot \frac{T'_q}{T'_{qo}}$
Constantes de temps transitoires et subtransitoires à vide (indice o) et en court-circuit	$T'_{do} \approx \frac{L_r}{R_r}$ $T'_d \approx \frac{1}{R_r} \cdot \left(L_r - \frac{3}{2} \frac{M_{df}^2}{L_d} \right)$ $T_D \approx \frac{1}{R_D} \cdot \left(L_D + \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} M_{dD} \cdot M_{Df}}{M_{df}} \right)$ $T''_{do} \approx \frac{L_D - \frac{M_{Df}^2}{L_r}}{R_D}$	$T'_{qo} \approx \frac{L_Q}{R_Q}$ $T'_q \approx \frac{1}{R_Q} \cdot \left(L_Q - \frac{3}{2} \frac{M_{qQ}^2}{L_q} \right)$

I. 8 Conclusion

La détermination précise et fiable des paramètres de la machine est très importante car elle permet de réaliser un contrôle robuste et surtout de garantir sa stabilisation en cas de grande perturbation.

Le tracé des caractéristiques de réponse en fréquence permet d'obtenir les réactances synchrones, transitoires et sub_transitoire

CHAPITRE II

Modélisation de l'alternateur

II.1 Introduction

Dans cette seconde partie de notre mémoire, on développe un modèle numérique de l'alternateur comme on effectue un rappel sur les différentes équations mécaniques et électriques de l'alternateur. Un choix adéquat du modèle permet de connaître le comportement dynamique et de vérifier la stabilité du système. De plus, il est possible de faire varier les paramètres du générateur dans le but d'obtenir les performances souhaitées.

On présente le modèle mathématique de la génératrice synchrone et son système d'excitation dans le repère triphasé (abc) puis dans le référentiel de (Park).

II.2 Modèle mathématique de l'alternateur

La machine étudiée, 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 ayant un enroulement fictif représentant l'effet des amortisseurs.

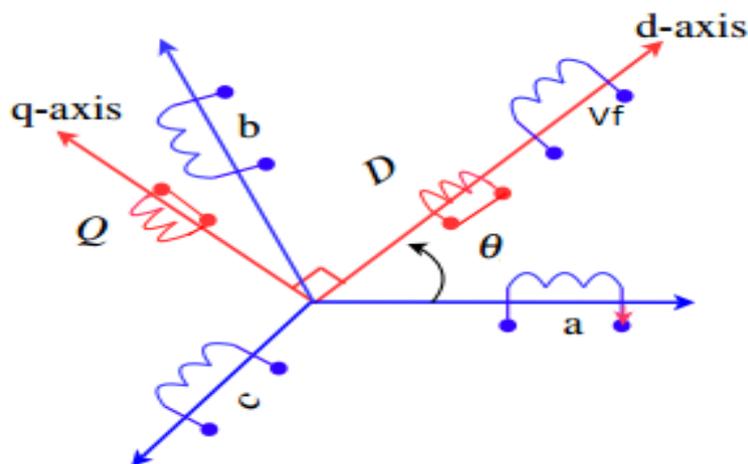


Fig. II.1. Schéma équivalent de la machine synchrone munie d'amortisseurs [6], [9].

Le schéma simplifié de la machine est donné par la Fig. II.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 [12].

- Equations des tensions au stator

Les équations des tensions sont données comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- Equations des tensions au rotor

La fonction de base du système d'excitation est de fournir un courant continu aux bobines créant ainsi 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 de l'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 [9] [10] :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Les équations mécaniques qui correspondent au fonctionnement mécanique de l'alternateur synchrone sont [13] :

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - Dw_r) \\ \frac{d\delta}{dt} = w_s(w_r - 1) \\ T_e = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q \end{cases} \quad (2.4)$$

II.3 Passage du référentiel d'axes (abc) au référentiel de Park

L'ensemble des équations électriques statoriques et rotoriques ainsi que 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. Elle 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 l'expression suivante, [4]:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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] tel que:

$$[P_M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

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 ; on obtient alors :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

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 :

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} \quad (2.10)$$

En remplaçant les équations (2.7), (2.8) et (2.9) dans la relation (2.10) on obtient :

$$V_{dqo} = [P_M] * [R] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1} * \Psi_{dqo}] \quad (2.11)$$

$$V_{dqo} = [R] * [P_M] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * [P_M]^{-1} * \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + [P_M] * \Psi_{dqo} * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1}] \quad (2.12)$$

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + w_s * \Psi_{dqo} * [P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] \quad (2.13)$$

Avec

$$\frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\Theta) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 4\pi/3) & -\cos(\Theta + 4\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Et

$$[P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Après avoir remplacé l'équation (2.15) dans (2.13) on obtient l'équation de la loi d'Ohm généralisée au niveau du stator :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} + w_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Soit

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \\ V_o = -r_a i_o + \frac{d}{dt} \Psi_o + 0 \Psi_o \end{cases} \quad (2.17)$$

Etant donné que l'axe homopolaire nul, on ne prend que les deux premières équations du système (2.18), on obtient le nouveau modèle dans le repère de Park :

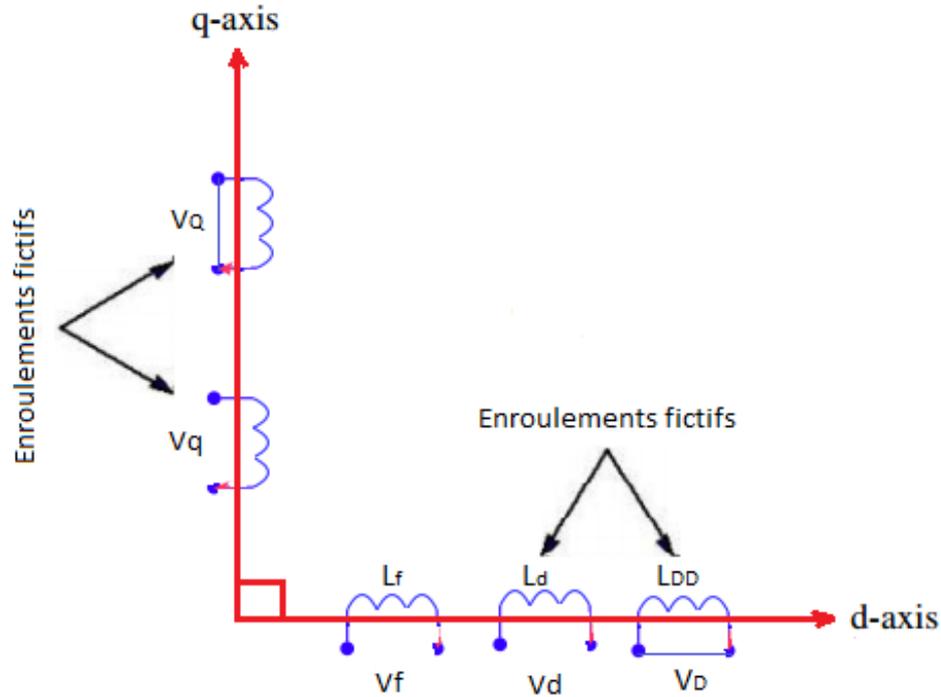


Fig. II.2. Modèle de la machine synchrone dans le repère (dq0)

Le système suivant représente les équations au rotor et au stator [7] :

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \\ V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \\ 0 = r_D i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D \\ 0 = r_Q i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q \end{cases} \quad (2.18)$$

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 :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

- 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, [4] [5] :

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d i_d + M_{df} i_f + M_{dD} i_D \\ \Psi_q = -L_q i_q + M_{qQ} i_Q \\ \Psi_f = -M_{df} i_d + L_f i_f + M_{fD} i_D \\ \Psi_D = -M_{dD} i_d + M_{Df} i_f + L_D i_D \\ \Psi_Q = -M_{qQ} i_q + L_Q i_Q \end{cases} \quad (2.20)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

On remplace les flux de la relation (3.21) dans le système d'équations (3.19), et on obtient le modèle régissant le fonctionnement de l'alternateur en fonction des courants, [5] [7] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Le système (2.22) peut être écrit sous la forme simplifiée suivante :

$$V = [R_a] * I + [A] * \frac{dI}{dt} + [G] * I \quad (3.23)$$

Avec :

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

$$[G] = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La tension aux bornes du générateur V_t est donnée par l'équation suivante [5] :

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (2.24)$$

Le courant statorique est obtenu de la même manière telle que [5]:

$$i_m = (i_d^2 + i_q^2)^{1/2} \quad (2.25)$$

La puissance P_e à la sortie du générateur est donnée par [5] :

$$P_e = V_d i_d + V_q i_q \quad (2.26)$$

II.4. Blocs Simulink

Les équations précédentes ont permis de déterminer les modèles Simulink pour l'alternateur.

- Bloc de l'alternateur à vide

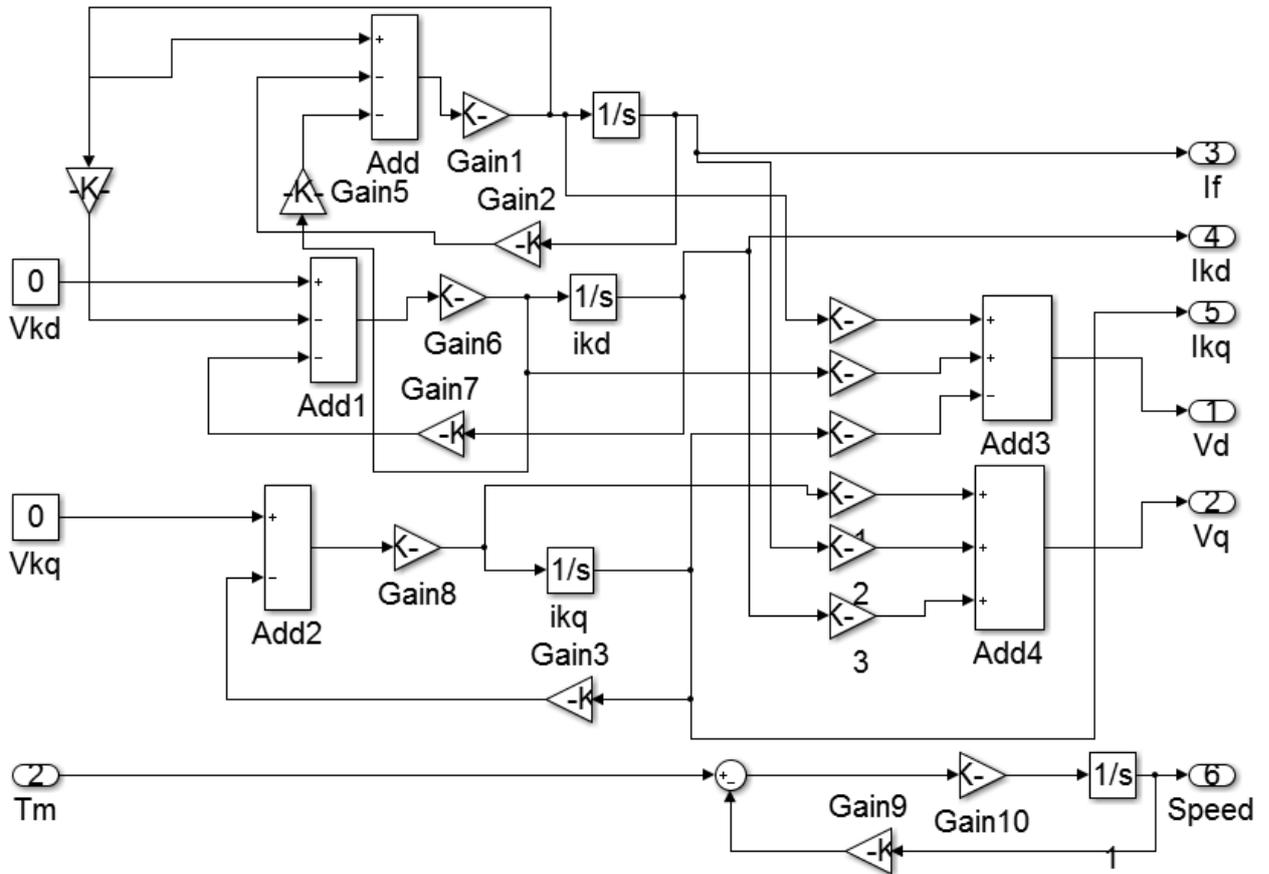


Fig. II.3. Réalisation du modèle de l'alternateur à vide sous environnement Simulink

Le modèle de l'alternateur peut être représenté par un bloc possédant deux entrées et six sorties tel que représenté par la Fig. II. 4.

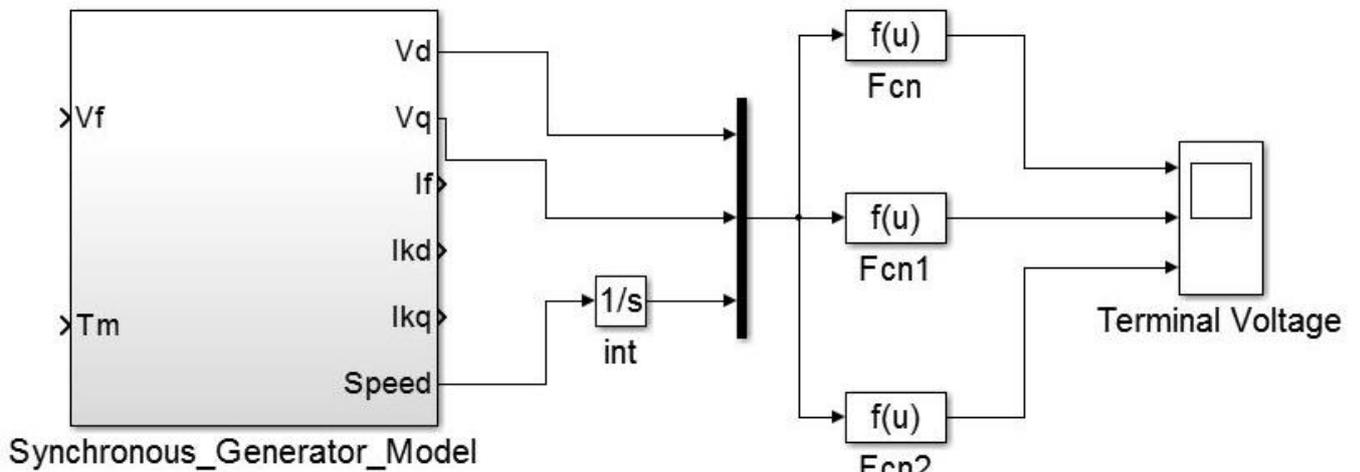


Fig. II. 4. Modèle simplifié de l'alternateur

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 Fig. II. 5.

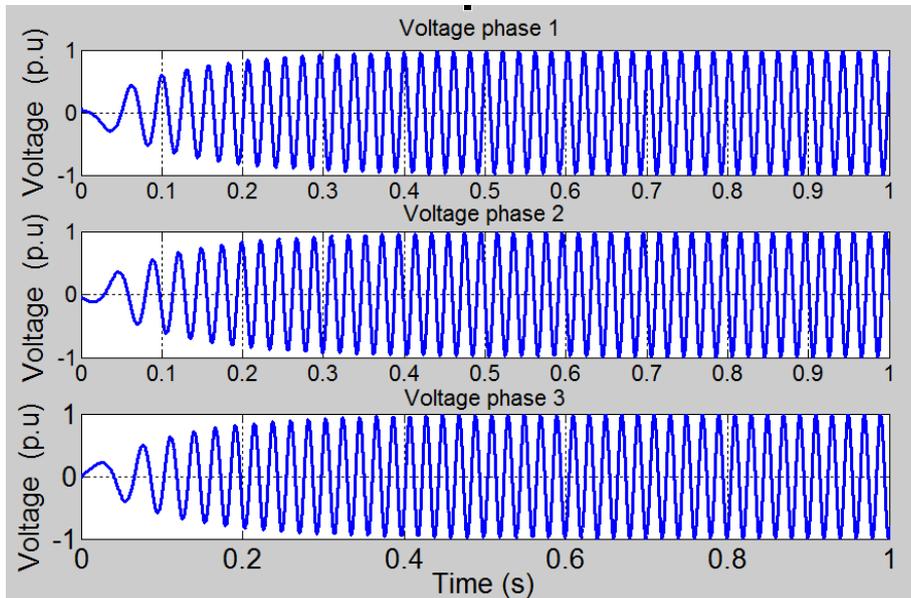


Fig. II.5. Tension de sortie de l'alternateur à vide

La vitesse de rotation est donnée par la Fig. II. 6.

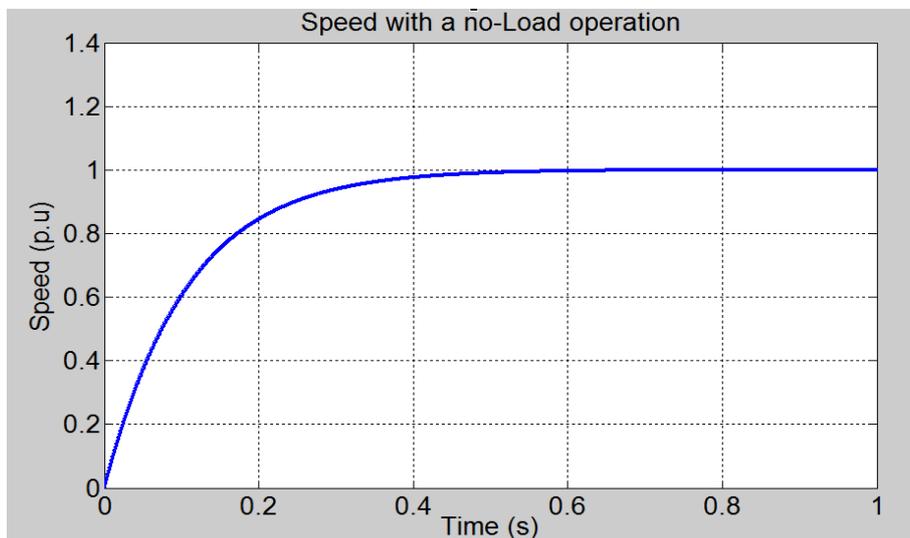


Fig. II.6. Vitesse de rotation à vide

Le courant d'excitation, le courant d'enroulement amortisseur sur les axes d et q sont représentés par la Fig. II. 7.

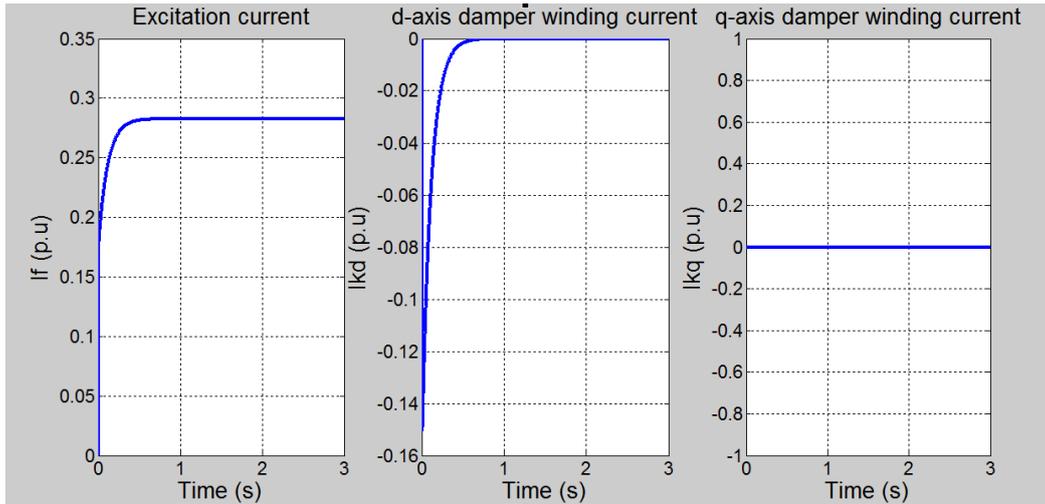


Fig. II.7. Les courants I_f , I_D et I_Q

- Schéma Bloc de l'alternateur en charge

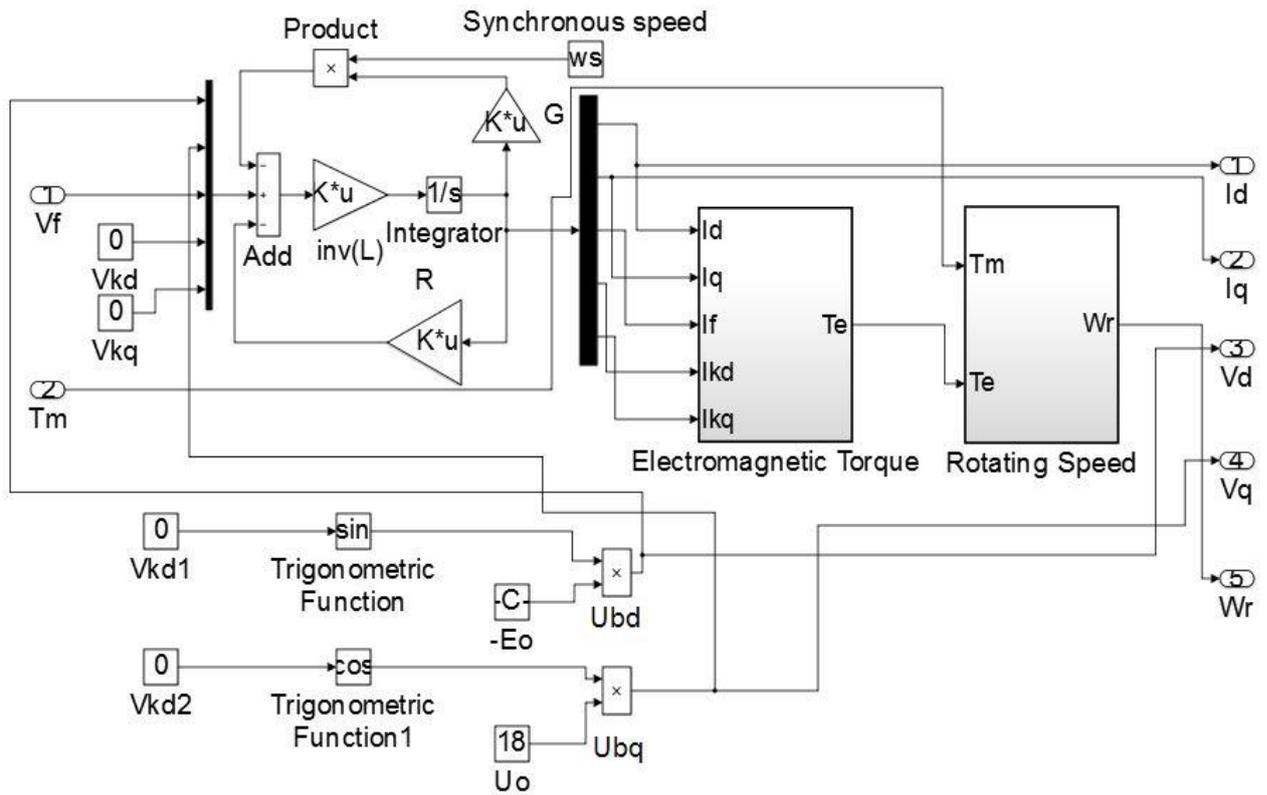


Fig. II.8. Modèle de l'alternateur en charge sous Simulink

Le bloc de simulation du couple électromagnétique est :

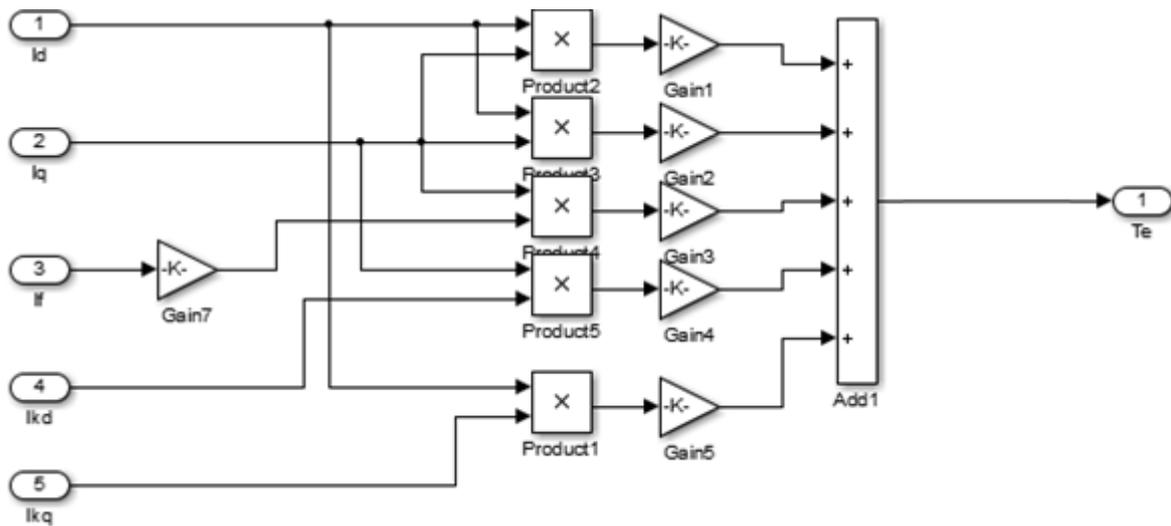


Fig. II.9. Bloc-Simulink du couple électromagnétique.

Résultats de simulation de l'alternateur en charge

Nous présentons sur la Fig.II.10 les courants statoriques et la vitesse de rotation de la génératrice en charge sur la Fig.II.11.

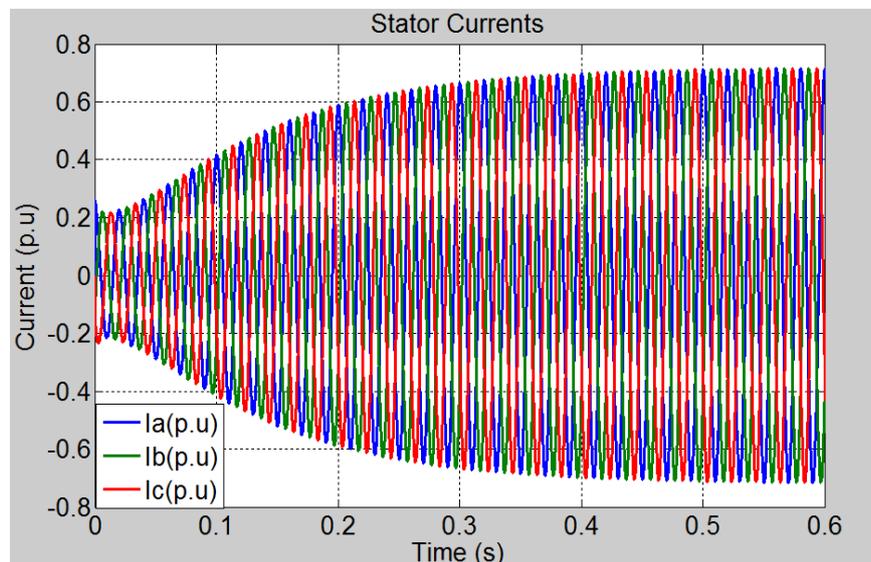


Fig. II.10. Courants des trois phases statoriques

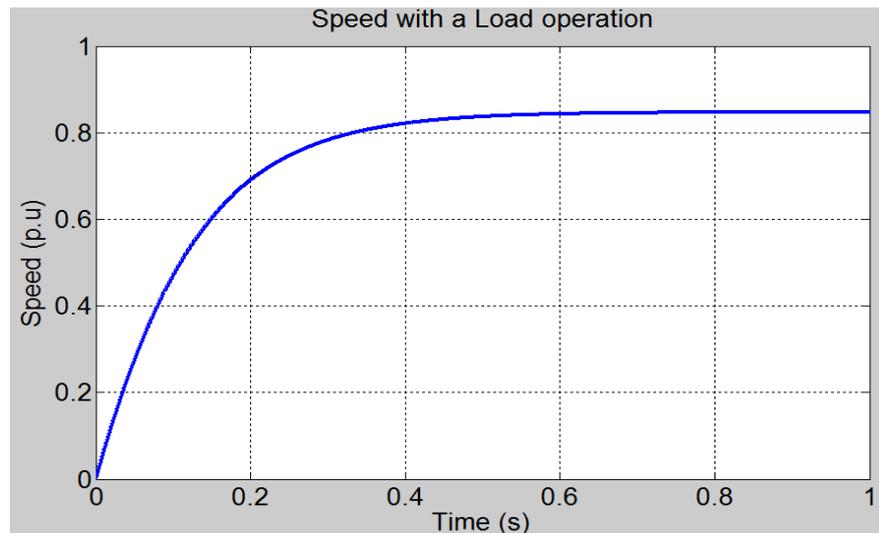


Fig. II.11. Vitesse de rotation en charge

- *Interpretation des resultats*

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

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une modélisation de l'alternateur. On a réalisé dans un premier temps un test de fonctionnement à vide puis en charge. 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 autre au niveau de la vitesse de rotation de la génératrice.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte essentiellement sur le calcul et l'identification des paramètres obtenus à partir de différentes méthodes d'identification. On a fait appel aux essais de court-circuit et aux essais à vide avant de nous intéresser à la modélisation du générateur synchrone. Il convient de rappeler que l'identification paramétrique des machines électriques, particulièrement la machine synchrone, constitue un axe de recherche important en vue de leur simulation, de leur commande et leur diagnostic.

Les simulations obtenus à partir du modèle implémenté sous l'environnement Matlab Simulink nous ont permis de percevoir et d'analyser les différentes grandeurs de sortie de l'alternateur, à savoir : les tensions de sortie, les courants des trois phases et la vitesse de rotation.

Globalement, ce mémoire nous a permis de :

- D'exploiter la détermination des paramètres de la machine synchrone d'une centrale de production d'énergie électrique à partir des essais expérimentaux
- De calculer les paramètres nécessaires de cet alternateur étudié
- De développer un modèle mathématique de cet alternateur à vide
- De développer un modèle mathématique de cet alternateur en charge

REFERENCES

Références

- [1] Fernando L. Alvarado, Senior Member, Claudio Caiizares, 'synchronous machine parameters from sudden-short tests by back-solving', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, June 1989.
- [2] I.M. Canay, 'Determination of model Parameters of Synchronous Machines', Proceedings IEE, Vol.130, part B, pp.89-94, March 1983.
- [3] B. Adkins and R.G. Harley, 'The General Theory of Alternating Current Machines. John Wiley & Sons', Incorporated, 1978, (279 pages).
- [4] J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier, 'Introduction à l'électrotechnique approfondie' Technique and documentation, Paris, 1981.
- [5] John R.Smith, 'Response Analysis of A.C.Electrical Mahines', Computer Models and Simulation', Research Studies Press Ltd, 1990
- [6] 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.
- [7] Rachid Abdessemed, 'Modélisation et simulation des machines électriques', Ellipses Technosup, Mai 2011, pp. 115-121
- [8] 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.
- [9] E. Mouni, S. Tnani, G. Champenois, 'Comparative study of three models methods of synchronous generator'. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris, France, 2006.
- [10] P. Subramaniam, O.P. Malik, 'Digital simulation of a synchronous generator in direct phase quantities', Proc. IEE 118, January 1971 ,pp153–160.
- [11] Lamy Abdeljalil, ' Modélisation dynamique et commande des alternateurs couplés dans un réseau ´ électrique embarqué' Electric power. Université de Nantes, 2006.
- [12] Hemmami Mohammed Ilyes, ' Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant', Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra 2011.
- [13] Juste Tsofie Wamba, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale hydro-québec', PHd thesis, Université du Québec en abitibi-témiscamingue, décembre, 2013, pp 26-27.
- [14] Paul C.Krause,Oleg.Wasynczuk,Scott,Scott D.Sushaff, 'Electric Machinery And Drive Systems', Second edition IEEE press series on power engineering 2002,pp 155-157.