

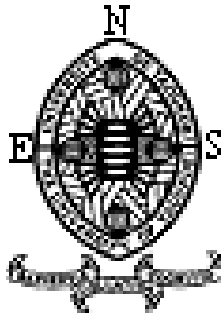
REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE
SUPERIEURE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING
COLLEGE

DEPARTEMENT OF PHYSICS

CIRCUIT ÉLECTRONIQUE DE L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU MODÈLE 4D D'UN GENERATEUR SYNCHRONE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement

Secondaire Deuxième Grade

(DIPES II)

Par :

TAFFOU DJIAMO ARNOLD

Licencié en Physique

Matricule : **CM04-10SCI0929**

Sous la Direction du :

Professeur : **ATANGANA JACQUES**

Maître de conférences

Année académique :2015– 2016

CIRCUIT ÉLECTRONIQUE DE L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU MODÈLE 4D D'UN GENERATEUR SYNCHROME

Présenté par :

TAFFOU DJIAMO ARNOLD

licencié ès physique

Sous la Direction du

Professeur **ATANGANA Jacques**

Maître de conférences

Université de Yaoundé I

2016

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

- A mon regretté grand père papa **WOUAPI ANDRE**.
- A toute ma grande famille.

acceptez ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera jamais à la hauteur de votre amour et de vos sacrifices.

Remerciements

Ce travail est le fruit des efforts intenses que ma modeste personne ne peut prétendre avoir fourni seule. Qu'il me soit permis d'exprimer toute ma gratitude :

- À **DIEU** le père tout puissant qui m'a accordé la santé, la force et le courage nécessaire pour la réalisation de ce travail
- Au professeur **ATANGANA Jacques** , chef du laboratoire d'électronique appliqué à l'École Normale Supérieure de Yaoundé qui, malgré ses multiples occupations a encadré ce travail ;
- À tous les enseignants de l'École Normale Supérieure et en particulier ceux du département de Physique pour leurs enseignements ;
- Aux membres du jury qui, en dépit de leurs multiples occupations, ont accepté juger ce travail ;
- À Mr DJITIA KIAFOU Christian pour son aide, recevez ici la reconnaissance du travail que vous avez accompli ;
- À tous mes oncles et tantes en particulier Monsieur DJEUADJIE Robert et son épouse Mme DJOUSSI Lèa Rhonie, pour leur soutien sans faille ;
- À tous mes camarades de promotion et en particulier SAHA etienne dieudonné, TaTSA jeres, SIEWE carmen, SIEWE titus ,DEZOUNBE bernard,NIMPA fabrice, KAMDEM waffo, NOUPEYI stephane, DEUMI KAMAHA juliette, KUICHOU florian, MBAMI jeanne pour leur esprit d'équipe ;
- À mes frères et sœurs pour leur soutien indéfectible ;
- À tous mes amis et particulièrement WANDJI TABE jores, SOLE lasare, TAIWE martin, NOUBIBOU celestin, NGATCHOUA maurice, WOUAPI stephane, KEMAYOU MBIANDA adrien, KOUWE eric, MAHAMAT loutfi, HEUNTCHEU lee mariel , NGEU-LOHEU chrisale, NZDANA conrad, AMEWA gesrmirda, NJEUNGOUE wouassi stella, ESSENGUE ines balbine, TATSITA FOTOUOLA romuald , pour leur soutien moral et leurs encouragements ;
- À tous mes amis de Maroua pour leur soutien ;
- À tous ceux et celles qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de ce travail et dont mention n'a point été faite ici. Qu'ils reçoivent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des matières	v
Table des Figures	vii
Liste des tableaux	viii
Abréviations	ix
Resumé	x
Abstract	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 GENERALITES SUR LES MACHINES SYNCHRONES	3
1.1 Définition et présentation de la machine synchrone	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Présentation	3
1.2 Modes de fonctionnement	5
1.2.1 fonctionnement en génératrice (alternateur)	5
1.2.2 fonctionnement en moteur	6
1.3 Classement des machines synchrones	6
1.3.1 Machines à rotor bobiné	7
1.3.2 Machines à double excitation	7
1.3.3 Machine à aimant permanent	8
1.3.4 Machines à réductance variable	9
1.4 Applications des machines synchrones	9
1.4.1 Applications des générateurs	9
1.4.2 Applications des moteurs	10
1.5 Avantages et inconvénients de la machine synchrone	11

1.5.1	Avantages	11
1.5.2	Inconvénients	11
1.6	Mise en équation	12
1.6.1	Equations de base	14
1.6.2	Transformation de Park	17
1.6.3	Les équations de Park pour le générateur synchrone	18
2	METHODES D'ETUDE ET APPROCHE ELECTRONIQUE DES SYSTEMES DYNAMIQUES	20
2.1	But et principe de la modélisation des systèmes des puissances	20
2.2	Description des systèmes dynamiques	21
2.2.1	Définition d'un système dynamique	21
2.2.2	Système dynamique différentiel	21
2.2.3	Systèmes dynamiques linéaires et non linéaires	22
2.2.4	Stabilité d'un système linéaire régulier libre	23
2.2.5	Stabilité d'un système non linéaire	23
2.3	Principe de réalisation des systèmes dynamique des différents modèles du générateur synchrone	26
2.3.1	Modèle électromécanique du générateur synchrone : équation d'oscillation	26
2.3.2	Approche électromagnétique de la machine synchrone	28
2.4	Composant électronique mis en jeu dans les systèmes électroniques	32
2.4.1	Opérateur et symbole équivalent sur MATLAB Simulink.	32
2.4.2	Analogie électronique dans ORCAD PSPICE.	35
2.4.3	Principe de câblage dans Pspice.	39
3	CIRCUIT ÉLECTRONIQUE DE L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU MODÈLE 4D D'UN GENERATEUR SYNCHRONE	42
3.1	Modélisation	42
3.1.1	formulation et équations dynamiques du modèle d'ordre-4.	42
3.2	Etude de la stabilité du système	45
3.2.1	Détermination des points fixes du système (3.5)	45
3.2.2	Etude de la stabilité du système	46
3.3	Simulation numérique du modèle d'ordre-4	46
3.4	Approche électronique du système	48
3.4.1	approche Matlab simulink	48
3.4.2	l'approche du système électronique par Pspice	51
3.4.3	Analyse du système électronique	52
	IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET	56
	CONCLUSION GÉNÉRALE	59

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

60

Table des figures

1.1	symboles de la machine synchrone :Chevassu (2014)	5
1.2	Schéma illustrant le fonctionnement d'une machine synchrone en mode génératrice :(Amara et al. 2001)	6
1.3	schéma illustrant le fonctionnement d'une machine synchrone en mode moteur :(Amara et al. 2001)	6
1.4	classement des machines synchrones :(Xu et al. 1995)	7
1.5	Rotor à pôles lisses et Rotor à pôles saillants :(Xu et al. 1995)	7
1.6	principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique :Boldea (1992)	10
1.7	Machine synchrone 100 mW : Divoux (1995)	10
1.8	Circuit équivalent de la machine synchrone : (Oubidar & Bendaoud 2010)	12
1.9	Diagramme de Behn-Eschenbourg : (Oubidar & Bendaoud 2010)	13
1.10	Diagramme de Behn-eschenbourg avec les champs : (Oubidar & Bendaoud 2010)	13
1.11	Les quatre cadrans de fonctionnement : (Oubidar & Bendaoud 2010)	14
1.12	diagramme schématique présentant les trois phases du générateur synchrone :(Eremia & Bulac 2013)	15
1.13	les circuits du générateur synchrone : (a) circuit du rotor;(b) circuit du stator (Eremia & Bulac 2013)	15
1.14	Machine synchrone dans le repère de Park :(Oubidar & Bendaoud 2010)	18
2.1	Symbole d'une constante dans simulink.	32
2.2	Symbole du Gain dans simulink	32
2.3	Symbole du Produit dans simulink	33
2.4	Symbole du Sommateur dans simulink.	33
2.5	Symbole d'un intégrateur dans simulink.	33
2.6	Bloc simulink de l'équation (2.50)	35
2.7	symboles d'un résistor	35
2.8	Schéma du Symbole d'un condensateur.	36
2.9	schéma d'une source de tension continue	36
2.10	Symbole de l'amplificateur opérationnel(le TL084).	37
2.11	Schéma du montage amplificateur	37

2.12	Schéma du montage amplificateur inverseur	38
2.13	Schéma du Montage intégrateur.	38
2.14	Montage sommateur a trois entrées	39
2.15	schéma du circuit équivalent dans Pspice de l'équation (2.50)	40
3.1	évolution temporelle des variables du modèle avec pour condition initiales : $\omega_0 = 0; \delta_0 = 0.1; E'_{q0} = 1.073; E'_{d0} = -0.522$ à savoir :(a) de la vitesse angulaire du rotor; (b) de l'angle donnant la position du rotor; (c) de la f.é.m transitoire sur l'axe-q E'_q ; (d) de la f.é.m transitoire sur l'axe-d E'_d	47
3.2	schéma bloc simulink du système (3.5)	49
3.3	évolution temporelle des variables du modèle avec pour condition initiales : $\omega_0 = 0; \delta_0 = 0.1; E'_{q0} = 1.073; E'_{d0} = -0.522$ à savoir :(a) de la vitesse angulaire du rotor; (b) de l'angle donnant la position du rotor; (c) de la f.é.m transitoire sur l'axe-q E'_q ; (d) de la f.é.m transitoire sur l'axe-d E'_d	50
3.4	comparaison des courbes obtenues par analyse numérique en rouge et celles obtenues par simulink en jaune.	50
3.5	circuit électronique du système dynamique du générateur synchrone (modèle d'ordre-4).	52
3.6	évolution temporelle dans ORCAD PSPICE de ω en A; δ en B; E'_q en C et E'_d en D	54
3.7	comparaison des courbes obtenues par analyse numérique en rouge et celles obtenues par ORCAD PSPICE en vert.	55

Liste des tableaux

2.1	Tableau de Routh-Hurwitz.	26
3.1	fiche pédagogique	57

Abréviations

LESIRSATIE : laboratoire d'électricité signaux et robotique

LEC : laboratoire d'électronique de compiègne

MAP : machine à aimants permanents

MAPS : machine à aimants permanents surfacique

MRV : machine à réluctance variable

MAPI : machine à aimants permanents internes

RESUMÉ

Le présent travail porte sur la modélisation de la dynamique du générateur synchrone cas du modèle d'ordre-4, à fin de proposer un circuit électronique qui décrit son fonctionnement dans différents états. Après avoir présenté de façon globale les généralités sur les machines synchrones, nous avons ressortir les équations de base régissant son fonctionnement. D'ici, le système d'équation utilisé pour la conception du circuit électronique décrivant la dynamique du générateur synchrone a été obtenu. Par la suite, nous avons dégagés les outils mathématiques utiles pour la résolution du système dynamique obtenu. L'étude de la stabilité du système a été faite et grâce au théorème mathématique sur l'étude des conditions de stabilité, nous avons montré que notre système est stable. Nous avons dans la suite utilisée la méthode de Runge-Kutta d'ordre4 pour effectuer des simulations numériques, ce qui nous a permis d'obtenir les courbes d'évolution temporelle des différentes variables du système. Deux approches électronique ont été considérées dans ce travail à savoir : l'approche Matlab simulink et l'approche ORCAD Pspice. Nous avons dans chacune de ces approches construit le circuit électronique équivalent à notre système. Les résultats obtenus à partir du circuit électronique du bloc Matlab simulink et ORCAD Pspice étaient en parfait accord avec les résultats obtenus par analyse numérique.

Mots clés : générateur synchrone, modélisation, conception, système dynamique, circuit électronique

ABSTRACT

The present work is on the dynamic modelisation of synchronous generator case of model of order-4 so to propose an electronic circuit which describe its working in differents states. After presented in a global way the generalities on the Synchronous machines, we have bring out some basic equations catchy his working. From here, the equation system used for the conception of the electronic circuit describing the synchronous dynamic generator has been obtained. Following, we have give off mathematical implements used to resolve the dynamic system obtained. The study of the stability of the system has been done grace on the mathematic theorem on the study of the stability theorem we have shown that our system is stable. We have in the following used the method of Runge-Kutta order4 to effectuate the numerical simulations, what have permit us to obtained the differents variables system of the temporal evolution curve. Two electronic approachs have been considered in the staff be aware : the approach of Matlab Simulink and the approach of ORCAD Pspice. We have in each approach construct equivalent electronic circuit to our system. The obtained results by the electronic circuit of MATLAB-SIMULINK bloc and ORCAD Pspice was in perfect accord with the obtained results of numerical analysis.

Key words : synchronous generator, modelisation, conception, dynamic system, Electronic Circuit

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'utilisation croissante de l'énergie électrique dans la vie économique, sociale et industrielle de chaque pays, entraîne de plus en plus de problèmes au niveau du réseau électrique. Avec cette augmentation de la demande en énergie électrique, la fiabilité des équipements électriques devient un enjeu très important. A c'est effet, le domaine du génie électrique a connu diverses avancées depuis la fin des années 1970. On peut citer le développement des lignes à haute tension, dont l'utilisation réduit les pertes en énergie et les coûts de transport.

Pour ainsi palier aux nombreux problèmes rencontrés dans l'exploitation du réseau électrique, il est nécessaire de contrôler les différents équipements de ce dernier précisément les machines synchrones qui jouent un rôle important dans le réseau. En effet, parmi tous les équipements du réseau électrique, les générateurs d'électricité sont sans doute les équipements les plus importants et les plus coûteux. Leur état d'opération affecte directement la stabilité du réseau. La panne d'un générateur crée une perturbation au réseau local qui peut causer une interruption d'alimentation. Il est alors judicieux pour pouvoir mieux contrôler et pour mieux stabiliser le réseau électrique de s'intéresser au comportement dynamique du générateur synchrone, qui joue un rôle capitale dans la production de l'énergie électrique. La connaissance de son comportement dynamique permettrait ainsi de prédire ses réactions en fonction des perturbations dont elle serait sujette.

C'est pour apporter des pistes de solution à cette préoccupation que nous avons entrepris ce travail. Il s'agit de considérer la machine synchrone comme un système dynamique capable d'être approché électroniquement car sur la base de certaines hypothèses simplificatrices, la machine peut être approximativement modélisée par des circuits électriques à paramètres localisés constitués d'éléments linéaires tels que les inductances et les résistances.

Il est ainsi possible de concevoir des circuits électroniques à l'aide des logiciels tels que matlab Simulink, Pspice, ISIS Proteus permettant de simuler le comportement dynamique du générateur afin d'en étudier les réactions en fonction des perturbations et ainsi prévoir sa stabilité. Ceci constitue l'objectif principal de ce travail.

Le présent travail est organisé en trois chapitres :

- Au premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les machines synchrones notamment leur constitution, leurs principaux modes de fonctionnement, quelques avantages et inconvénients liés à leur utilisation.

- Au second chapitre, nous dégagerons les outils mathématiques nécessaires pour l'étude des systèmes dynamiques. Nous présenterons également les différentes approches qui permettent d'obtenir les équations qui décrivent la dynamique du modèle d'ordre-4 du générateur synchrone. Et enfin nous présenterons l'arsenal électronique nécessaire pour l'implémentation du circuit équivalent au modèle.

- Au troisième chapitre, nous exploiterons les éléments mathématiques déjà développés pour étudier la stabilité de notre système, ensuite, les outils électroniques présentés au chapitre deux nous permettra grâce aux logiciels Matlab Simulink et Pspice d'implémenté un circuit électronique représentant notre générateur.

Ensuite, nous présenterons sommairement l'intérêt pédagogique de notre travail, pour les futurs enseignants que nous sommes. Notre travail s'achèvera par une conclusion générale et quelques perspectives.

GENERALITES SUR LES MACHINES SYNCHRONES

Introduction

La machine synchrone est le générateur d'énergie électrique par excellence. Elle constitue la première catégorie importante des machines à courant alternatif. Ce chapitre introductif va nous permettre d'aborder les généralités sur les machines synchrones. Outre la constitution et le mode de fonctionnement des machines synchrones, nous établirons un classement exhaustif et illustré des machines synchrones. Les nombreuses applications et avantages de ces machines seront également mentionnés. Nous terminerons ce chapitre en rappelant les équations de base qui régissent le fonctionnement des machines synchrones.

1.1 Définition et présentation de la machine synchrone

1.1.1 Définition

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

1.1.2 Présentation

- Constitution

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor et d'une partie fixe, le stator. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant).

Rotor ou inducteur : Il est constitué d'électroaimants alimentés en courant continu (ou d'aimants permanents) créant $2p$ pôles inducteurs, successivement Nord et Sud. (p étant le nombre de paire de pôles). L'inducteur, mobile autour d'un axe, tourne à la vitesse de rotation n_s et crée un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme.

Stator ou l'induit : les conducteurs de l'induit, placés dans des encoches autour de la carcasse

de la machine, sont groupés en bobine. Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il possède donc le même nombre de paires p de pôles. Dans une machine synchrone triphasée bipolaire ($p=1$), le stator comporte 3 bobines identiques régulièrement décalées de 120° .

Quelle que soit sa constitution et son nombre de pôles, une machine synchrone est constituée de deux circuits indépendants :

- *Le bobinage d'excitation* : il est constitué d'un bobinage enroulé sur le rotor et traversé par le courant continu " d'excitation " : I_e . C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits " rotoriques " et l'instauration d'un flux donné dans le circuit magnétique. Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.
- *Le circuit d'induit* : il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, pratiqué sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

Il est à noter que, si les enroulements statoriques sont fixes, celui de l'excitation est tournant.

- principe de fonctionnement de la machine synchrone

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant est appelée " vitesse de synchronisme ". En régime établi, le rotor d'une machine synchrone tourne à la même vitesse ω (vitesse de synchronisme) que le champ produit par le stator. En conséquence, les champs statoriques et rotoriques sont fixes l'un par rapport à l'autre et tournent tous deux à la vitesse de synchronisme. Ces deux champs tendent à s'aligner à la façon de deux aimants attirés l'un par l'autre. Si l'on cherche à les écarter, un couple de rappel s'y oppose, du moins jusqu'à un certain point. Ce couple de rappel est appelé couple électromagnétique. Il est à l'origine de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement.

Il n'est pas possible de faire démarrer correctement, sans aide extérieure, une machine synchrone en connectant ses enroulements statoriques directement sur un réseau alternatif. Si l'on n'entraîne pas le rotor par une force extérieure, il est possible de la faire tourner en alimentant ses enroulements statoriques par un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro à la fréquence de synchronisme et en faisant en sorte que la tension aux bornes des enroulements soit proportionnelle à la fréquence. Sa vitesse de synchronisme sera directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique. Un autre moyen est de réaliser l'autopilotage de la machine, c'est-à-dire de maintenir l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique par exemple, en disposant sur son axe un capteur qui délivre une information de la position du rotor. Cette information est traitée par un convertisseur électronique qui fournit le courant statorique à la machine, en phase avec sa force contre électro-motrice.

Notons que la machine synchrone a été inventée par Nikola Tesla. Son concept figure dans un dépôt de sept brevets du 1er mai 1888 où il en décrit plusieurs variantes ainsi que le principe

du courant alternatif biphasé et triphasé et leur distribution. Tesla aurait développé cette idée de machine électrique quand il était étudiant à l'École polytechnique de Graz (1875 – 1876) : *wikipedia*(2016).

- SYMBOLES

Voici les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) : *Chevassu*(2014) :

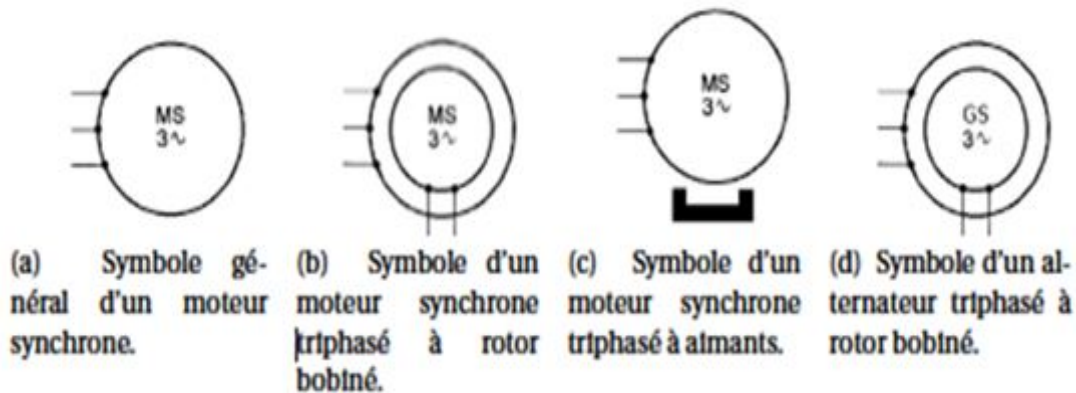


FIGURE 1.1 – symboles de la machine synchrone : *Chevassu* (2014)

1.2 Modes de fonctionnement

Les machines synchrones constituent la première catégorie importante des machines à courant alternatif. Comme toutes les autres machines, elles sont réversibles et peuvent fonctionner indifféremment en générateur ou en moteur : *Divoux* (1995).

1.2.1 fonctionnement en génératrice (alternateur)

En mode génératrice (alternateur), elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de force électromotrice (f.é.m) alternative de pulsation

$$\omega = p\Omega_s.$$

où :

p est le nombre de paires de pôles ;

Ω_s est la vitesse de synchronisation du rotor en tours par seconde.

Rappelons que toute variation de champs magnétique à travers une bobine créée aux bornes cette bobine une f.é.m. induite.

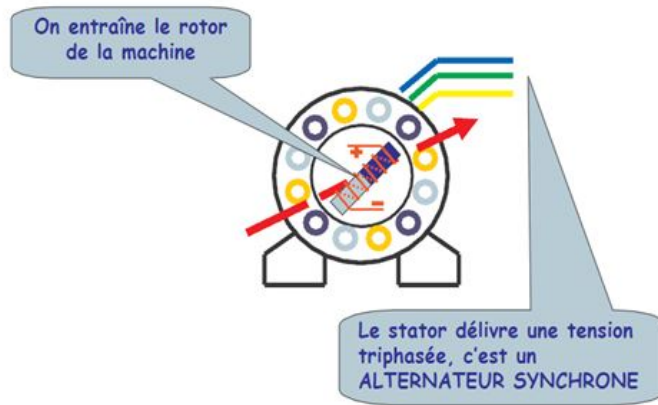


FIGURE 1.2 – Schéma illustrant le fonctionnement d'une machine synchrone en mode génératrice :(Amara et al. 2001)

1.2.2 fonctionnement en moteur

En mode moteur elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminé par la fréquence du courant. Le moteur synchrone converti la puissance électrique en puissance mécanique. En fonctionnement moteur, le champ tournant du stator " accroche " le champ lié au rotor à la vitesse $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$.

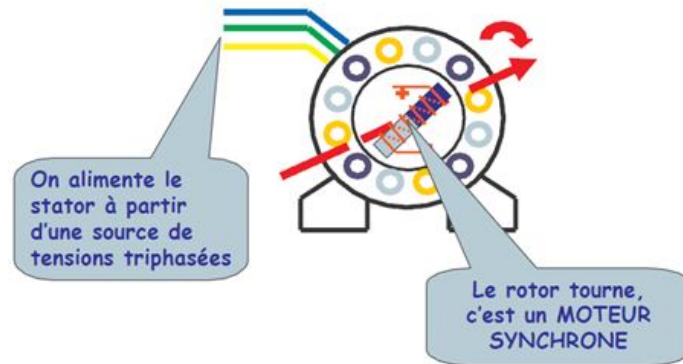


FIGURE 1.3 – schéma illustrant le fonctionnement d'une machine synchrone en mode moteur :(Amara et al. 2001)

1.3 Classement des machines synchrones

En reprenant le principe de la classification de Chalmers et de ces collègues : (Xu et al. 1995) , on peut agencer l'ensemble des machines synchrones comme l'indique la figure 1.4. Les machines sont distinguées par la nature de leur excitation (bobinages, aimants permanents,

etc.) et par leur rapport de saillance : $\xi = \frac{L_q}{L_d}$

où :

L_d est l'inductance de l'axe-direct et L_q l'inductance de l'axe quadrature. (figure1.4)

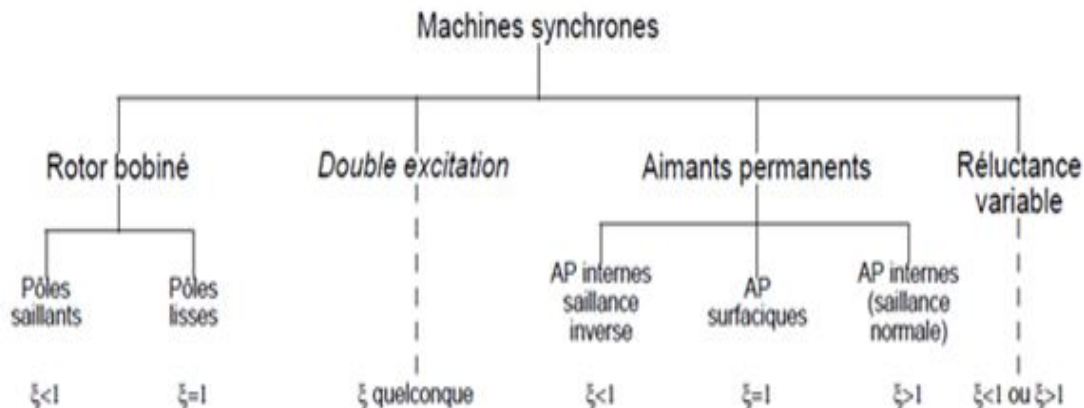


FIGURE 1.4 – classement des machines synchrones :(Xu et al. 1995)

1.3.1 Machines à rotor bobiné

Elles sont caractérisées par une excitation bobinée c'est-à-dire commandable et par un rapport de saillance égale à :

- l'unité pour les pôles lisses
- inférieur à l'unité pour les pôles saillants soit $L_q < L_d$ (voir figure 1.5)

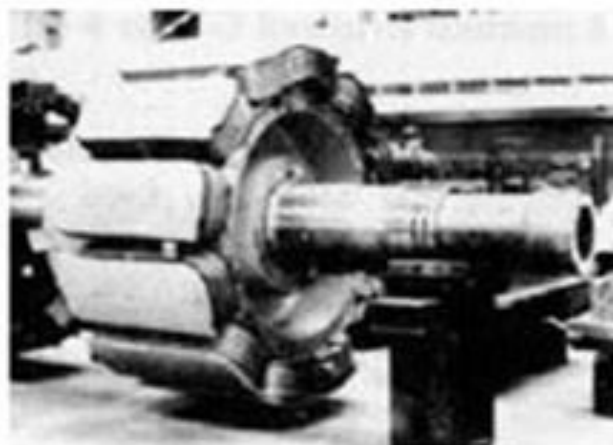


FIGURE 1.5 – Rotor à pôles lisses et Rotor à pôles saillants :(Xu et al. 1995)

1.3.2 Machines à double excitation

Ces machines peuvent combiner les principes de tous les types de machines existantes. On peut ainsi trouver un très grand nombre de structures envisageables. Pour plus d'informations

sur ces machines hybrides particulières, on peut se référer aux travaux du Laboratoire d'Electricité Signaux et Robotique (LESiRSATIE) de l'ENS de CACHAN et en particulier aux études Amara 01a et Amara 01b :(Amara et al. 2001) et (Xu et al. 1995)

1.3.3 Machine à aimant permanent

- *Machines à aimants permanents internes à saillance inverse*

Ces machines sont beaucoup plus récentes. On en trouve pour l'instant de trois sortes :

- Une machine atypique réalisée par Xu et ses collègues : (Chalmers et al. 1996)
- Les machines à barrières de flux quadrature : tirées des machines à aimants surfaciques ou internes à concentration de flux dont on réduit l'inductance quadrature en insérant des barrières de flux. Le rapport de saillance de ce type de machine descend difficilement en dessous de 0,4.
- Les machines à double rotor : elles combinent le plus souvent un rotor de MAPS (machine à aimant permanent surfacique) et un rotor de MRV (machine à réluctance variable). Selon la longueur de chaque partie du rotor et l'angle entre les axes directs respectifs, presque toutes les configurations (saillance et flux d'aimants) peuvent être obtenues. L'étude de Chalmers : (Adnanes & Undeland 1991), présente et étudie toutes les possibilités de ces machines en termes de défluxage.

- *Machines à aimants permanents surfaciques*

Leurs caractéristiques principales sont l'absence de saillance ($\xi = 1$) d'une part et de très faibles inductances d'autre part. Leurs principales applications concernent la robotique et les entraînements à dynamique très élevée. De nombreux auteurs s'en servent comme références par rapport aux machines à aimants internes et ont donc mené des études poussées : (Friedrich & Kant 1998). Le LEC (Laboratoire d'électromécanique de Compiègne) et la société Valeo Systèmes Electriques ont réalisé un moteur de ce type pour véhicule électrique : (Jahns et al. 1986) Typiquement, ces machines possèdent un flux d'aimant normalisé compris entre 0,8 et 0,96.

- *Machines à aimants permanents internes*

Sont incluses ici les machines à aimants permanents internes (MAPI) à saillance normale, c'est-à-dire pour $\xi > 1$. Les MAPI comprennent des structures très diverses. On trouve :

- Les machines à aimants insérés : basées au départ sur des structures à aimants surfaciques dont on aurait inséré les aimants dans le rotor.
- Les machines à aimants implantés radialement sont souvent appelées machines à concentration de flux
- Les machines à aimantation radiale : ce sont les seules appelées Interior Permanent Magnet machine dans la littérature. Etant les plus anciennes et les plus classiques, de nombreux articles leur sont consacrés : Chédot (2001) pour les plus importants. Cette machine est beaucoup utilisée pour les applications liées à la traction électrique. La société Valeo Systèmes Electriques et le LEC ont développé une amélioration de ce type de

machine pour une application alterno-démarreur :(Soong & Miller 1994)

1.3.4 Machines à réluctance variable

On peut trouver toutes sortes de machines à réluctance variable. D'ailleurs, Miller les considère comme des machines à aimants permanents internes dont le flux de l'aimant serait nul : (Miller et al 1989). Cela permet de mettre en commun toutes les structures de machines à aimants et toutes celles à réluctance variable. La plupart des auteurs traitant des machines à aimants internes sont des références pour les machines à réluctance variable. A l'instar de Miller et Lipo : (Boldea et al. 1992) Les dernières études, visant à augmenter le rapport de saillance, se sont tournées vers les machines à rotor laminé axialement. Néanmoins, les machines à double saillance (stator et rotor) classiques sont toujours d'actualité. En France, ce domaine fait partie des travaux de prédilection du LESIR (laboratoire d'électricité signaux et robotique) qui a permis à la société Valeo Systèmes Electriques de réaliser un alterno-démarreur de ce type. Les machines à réluctance variable se comportent d'autant mieux que leur rapport de saillance est élevé. Dans la littérature, BOLDEA a réussi à réaliser une machine dont le rapport de saillance atteint 20 (Boldea et al. 1992) mais la plupart des machines ont un rapport de saillance compris entre 5 et 14, ($5 < \xi < 14$).

1.4 Applications des machines synchrones

La machine synchrone comporte de nombreuses applications dans les domaines tels que les industries ; les usines ; l'automobile etc. Etant donné qu'elle possède deux modes de fonctionnement à savoir : fonctionnement en moteur et fonctionnement en générateur, nous allons dans la suite donner les applications pour chaque mode de fonctionnement.

1.4.1 Applications des générateurs

On les trouve dans les barrages sur les fleuves ou les lacs. Au Cameroun, on les trouve dans les barrages tels que : le barrage hydroélectrique de Lom pangar, de Men mvele etc. Le barrage permet d'accumuler de l'eau en quantité en formant un lac. Lorsque les vannes sont ouvertes, l'eau s'engage dans une conduite qui la canalise vers la centrale. L'eau entraîne la rotation de la turbine. La turbine entraîne l'alternateur qui produit du courant électrique. Celui-ci est redressé par un transformateur avant d'être transporté par les lignes à haute tension. La figure suivante illustre bien ce principe de fonctionnement :

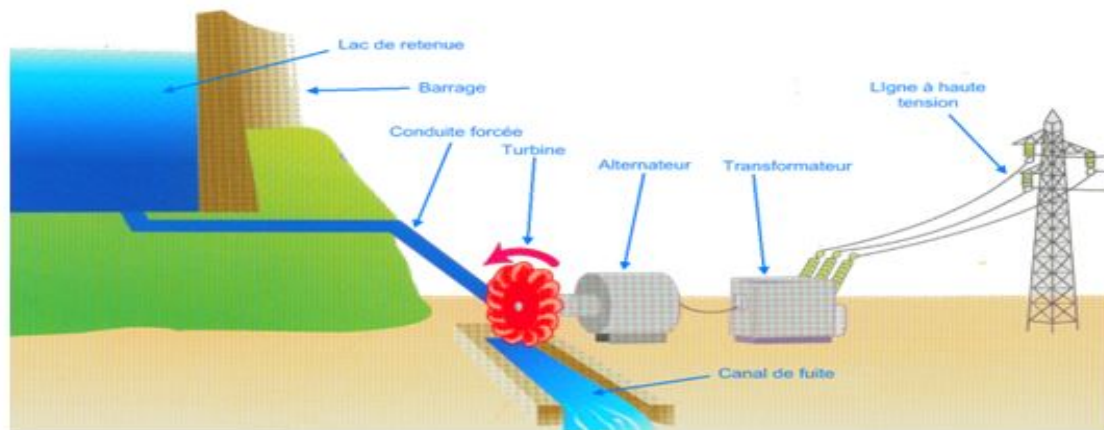


FIGURE 1.6 – principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique :Boldea (1992)

Au Canada par exemple, la quasi-totalité de l'électricité produite est issue d'alternateur de type synchrone : Divoux (1995). Ces alternateurs de très forte puissance (jusqu'à 1500 MVA) diffèrent des machines synchrones classiques essentiellement par :

- La géométrie : l'augmentation de la puissance des alternateurs entraîne l'agrandissement de sa taille. Dépendamment de l'utilisation l'augmentation de la taille peut concerner soit la longueur ou la périphérie de la machine.
- Les systèmes de refroidissement ainsi que les systèmes d'excitation sont eux aussi impressionnants pour les gros alternateurs.



FIGURE 1.7 – Machine synchrone 100 mW : Divoux (1995)

1.4.2 Applications des moteurs

- Ils sont utilisés en forte puissance : 1 à 10 MW mégawatt (MW) (compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques.

- *Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmeur, servomoteur).*
- *Le moteur synchrone peut également être utilisé comme source de puissance réactive Q pour relever le facteur de puissance $\cos \varphi$ d'une installation électrique*
- *La deuxième génération de TGV (rames du TGV atlantique) utilise pour ses motrices des moteurs dits autosynchrones , qui sont des moteurs synchrones alimentés par des onduleurs de fréquence variable, automatiquement accordés sur la fréquence de rotation des moteurs.*

1.5 Avantages et inconvénients de la machine synchrone

Bien que la machine synchrone possède de nombreuses applications, il est cependant à noter qu'elle comporte un certain nombre d'avantages et d'inconvénients par rapport à d'autres types de machines.

1.5.1 Avantages

Comme avantages, on peut citer :

- *La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%*
- *On peut régler son facteur de puissance $\cos \varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e*
- *Rendement et facteur de puissance élevé.*
- *Capacité à fonctionner à très haute vitesse.*
- *Puissance massique et volumique importante*
- *Meilleures caractéristiques thermiques, la localisation des pertes fer au stator simplifie son refroidissement.*

1.5.2 Inconvénients

- *Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire. Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.*
- *Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête*
- *Complexité du contrôle dans le cas des moteurs à aimant permanent car le commutateur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique.*
- *Présence des pulsations de couple*
- *Risque de désaimantation*

1.6 Mise en équation

Pour pouvoir étudier le fonctionnement d'une machine synchrone en régime sinusoïdal, toutes les pertes, ainsi que les phénomènes de saturation seront négligés. Ce qui donne pour une phase le schéma équivalent suivant : (figure1.8)

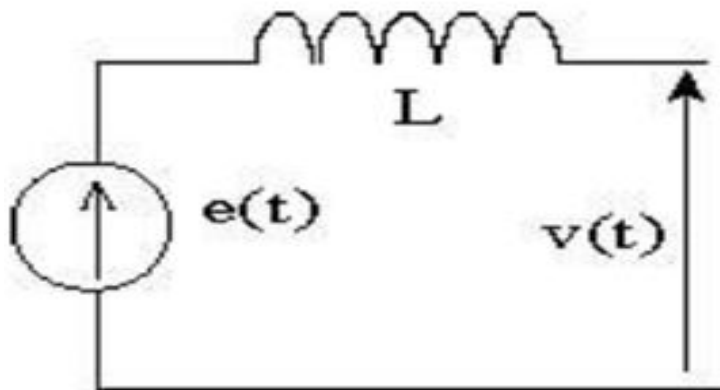


FIGURE 1.8 – Circuit équivalent de la machine synchrone : (Oubidar & Bendaoud 2010)

À noter :

ω_s : La vitesse du champ tournant.

L : Inductance cyclique de la machine.

$e(t)$: La f.e.m. créée par le champ magnétique rotorique dans une phase de la machine.

E : La valeur efficace de $e(t)$.

φ : le déphasage entre V et I .

Φ : Le déphasage entre E et I .

L'équation de la tension de sortie est :

$$V = E + jL\omega I \quad (1.1)$$

Il est alors possible de tracer le diagramme de Fresnel correspondant à l'équation des tensions d'une phase de la machine : Un tel diagramme porte le nom de diagramme de Behn-Eschenbourg :

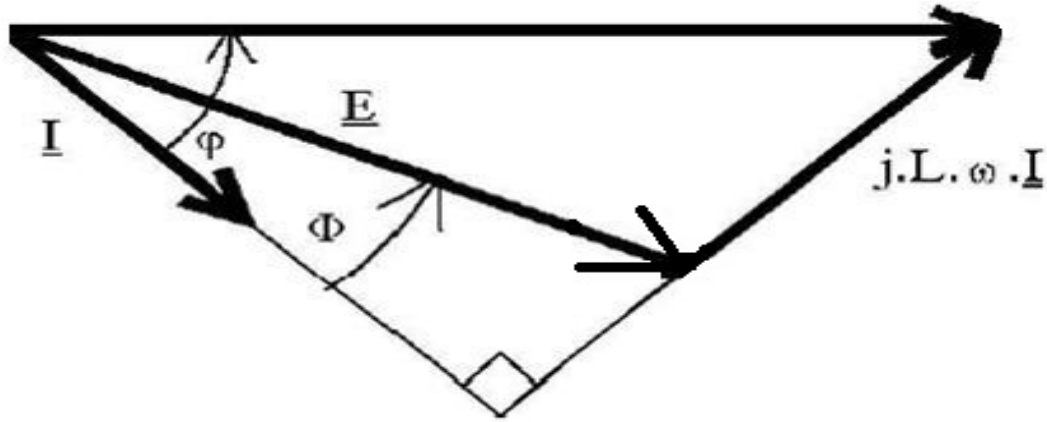


FIGURE 1.9 – Diagramme de Behn-Eschenbourg : (Oubidar & Bendaoud 2010)

Si on veut tracer sur ce même diagramme l'image des champs statorique et rotorique, il suffit de mettre en phase le courant avec le champ statorique et de mettre le champ rotorique en retard par rapport au courant de $\frac{\pi}{2} - \Phi$. (figure 1.10)

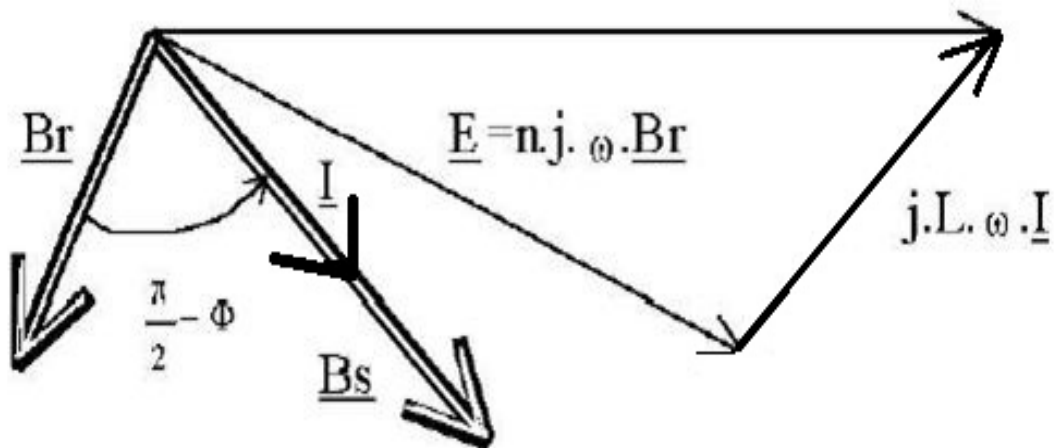


FIGURE 1.10 – Diagramme de Behn-eschenbourg avec les champs : (Oubidar & Bendaoud 2010)

Une des particularités de la machine synchrone est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques. Il est en effet possible de rendre à volonté la machine inductive ou capacitive, que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur. Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude de E , c'est-à-dire sur le courant d'excitation rotorique. On obtient alors les diagrammes de Behn-Eschenbourg suivants (Figure 1.11)

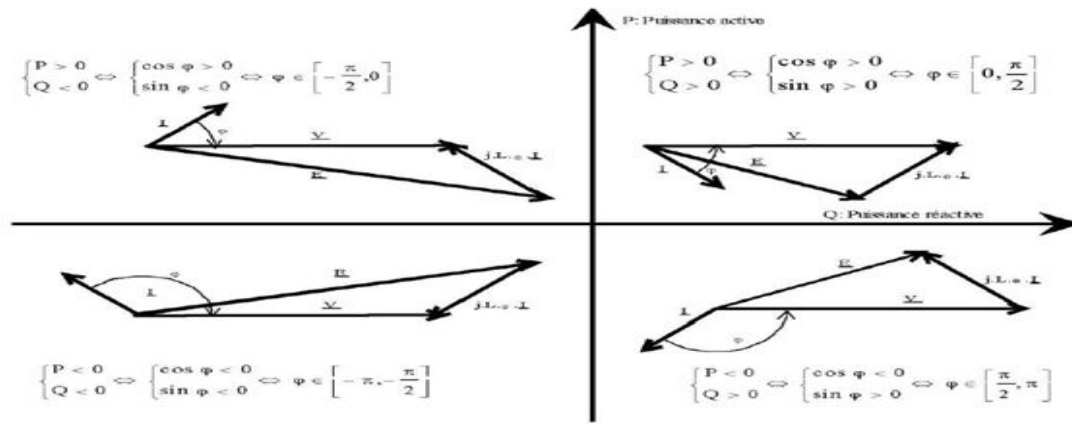


FIGURE 1.11 – Les quatre cadrans de fonctionnement : (Oubidar & Bendaoud 2010)

Il est possible de constater que lors d'un fonctionnement capacitif, la f.é.m. E est supérieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est surexcitée. Lors d'un fonctionnement inductif, la f.é.m. E est inférieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est sous-excité.

1.6.1 Equations de base

Dans le développement des équations de la machine synchrone, les hypothèses suivantes sont considérées : (Eremia & Bulac 2013) :

- Les enroulements statoriques sont distribués sinusoïdalement le long du air gap jusqu'au point ou les effets mutuels avec le rotor soit pris en compte.
- Les fentes du stator ne permettent pas la variation de l'inductance du rotor avec la position de ce dernier.
- L'hystérésis magnétique est négligeable.
- Les effets de la saturation magnétique sont négligeables

Les équations de la machine synchrone seront développées premièrement en considérant les relations linéaires flux-courants.

Sur la figure (1.12) ci-dessous, on identifie les circuits suivants :

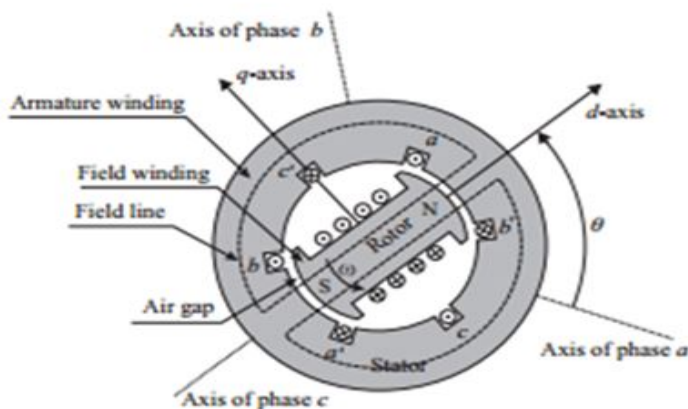


FIGURE 1.12 – diagramme schématique présentant les trois phases du générateur synchrone : (Eremia & Bulac 2013)

- *Les circuits du stator*

Le champ d'enroulement $a-a'$, $b-b'$ et $c-c'$ sont séparés de 120° en rotant dans le sens trigonométrique. Les tensions aux bornes des enroulements statoriques sont V_a, V_b et V_c et les courants sont i_a, i_b et i_c

- *Les circuits du rotor* Le champ d'enroulement $f-f'$ est considéré comme l'axe direct, appelé axe-d et l'axe en quadrature qui est l'axe formant un angle de 90° avec l'axe direct. (voir figure 1.13).

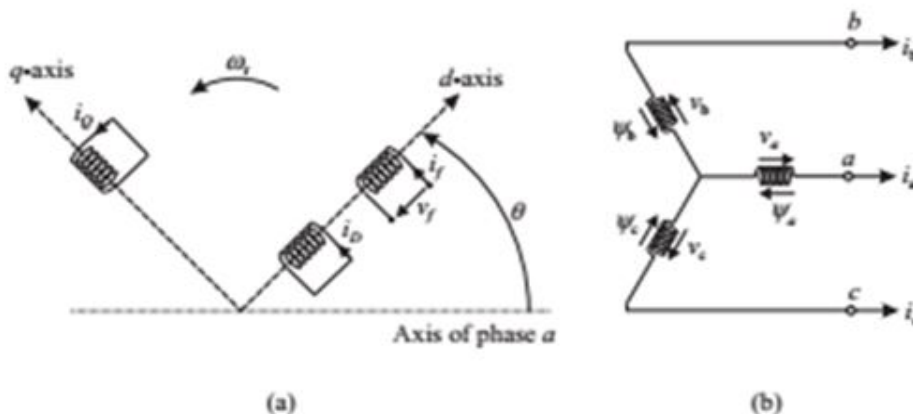


FIGURE 1.13 – les circuits du générateur synchrone : (a) circuit du rotor ;(b) circuit du stator (Eremia & Bulac 2013)

La position du rotor est donnée par l'angle θ mesuré entre l'axe-d et l'axe de l'enroulement de la phase a.

Dans l'optique d'établir les équations décrivant le fonctionnement du générateur synchrone, convention du générateur pour les circuits du stator a, b, c. le champ de circuit du rotor sera quant-à lui associé en accord avec la convention de charge. Les directions arbitraires peuvent

être choisies pour les courants dans le circuit (Eremia & Bulac 2013). Ainsi, en appliquant les lois de l'induction de Faraday, les différentes équations instantanées de la tension et les équations du flux magnétique exprimées per unit (p.u) peuvent être développées.

Equations des tensions

- Pour les enroulements du stator, on a :

$$\begin{cases} V_a(t) = -R_a i_a(t) + \frac{d\Psi_a(t)}{dt} \\ V_b(t) = -R_b i_b(t) + \frac{d\Psi_b(t)}{dt} \\ V_c(t) = -R_c i_c(t) + \frac{d\Psi_c(t)}{dt} \end{cases} \quad (1.2)$$

Où :

R_a , R_b et R_c sont les résistances des phases a, b et c respectivement

Ψ_a , Ψ_b et Ψ_c les flux de liaisons des enroulements a, b et c du stator.

sous forme matricielle, ces équations sont exprimées par :

$$[V_s] = -[R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s]. \quad (1.3)$$

Où :

$[R_s]$ est la résistance sous forme matricielle des phases du stator

$[i_s]$ est le courant sous forme matricielle des phases du stator

$[\Psi_s]$ est l'expression matricielle du flux de liaison du stator

- Pour les enroulements du rotor, on a :

$$\begin{cases} V_f(t) = R_f i_f(t) + \frac{d\Psi_f(t)}{dt} \\ 0 = R_D i_D(t) + \frac{d\Psi_D(t)}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q(t) + \frac{d\Psi_Q(t)}{dt} \end{cases} \quad (1.4)$$

Où :

R_f , R_D et R_Q sont les résistances des enroulements du circuit f, D et Q respectivement

Ψ_f , Ψ_Q et Ψ_D les flux de liaisons des enroulements f, D et Q du rotor.

sous forme matricielle, ces équations sont exprimées par :

$$[V_R] = -[R_R][i_R] + \frac{d}{dt}[\Psi_R]. \quad (1.5)$$

Où :

$[R_R]$ est la résistance sous forme matricielle des circuits du rotor

$[i_R]$ est le courant sous forme matricielle des circuits du rotor

$[\Psi_s]$ est l'expression matricielle du flux de liaison du rotor

Equations des flux magnétique sous forme matricielle

Les flux sont liés aux courants par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_a(t) = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{af}i_f + l_{aD}i_D + l_{aQ}i_Q \\ \Psi_b(t) = -l_{ba}i_a - l_{bb}i_b - l_{bc}i_c + l_{bf}i_f + l_{bD}i_D + l_{bQ}i_Q \\ \Psi_c(t) = -l_{ca}i_a - l_{cb}i_b - l_{cc}i_c + l_{cf}i_f + l_{cD}i_D + l_{cQ}i_Q \\ \Psi_f(t) = -l_{fa}i_a - l_{fb}i_b - l_{fc}i_c + l_{ff}i_f + l_{fD}i_D + l_{fQ}i_Q \\ \Psi_D(t) = -l_{Da}i_a - l_{Db}i_b - l_{Dc}i_c + l_{Df}i_f + l_{DD}i_D + l_{DQ}i_Q \\ \Psi_Q(t) = -l_{Qa}i_a - l_{Qb}i_b - l_{Qc}i_c + l_{Qf}i_f + l_{QD}i_D + l_{QQ}i_Q \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Sous forme matricielle, on a :

$$\begin{bmatrix} \Psi_a(t) \\ \Psi_b(t) \\ \Psi_c(t) \\ \dots \\ \Psi_f(t) \\ \Psi_D(t) \\ \Psi_Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & \vdots & l_{af} & l_{aD} & l_{aQ} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & \vdots & l_{bf} & l_{bD} & l_{bQ} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & \vdots & l_{cf} & l_{cD} & l_{cQ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & \vdots & l_{ff} & l_{fD} & l_{fQ} \\ l_{Da} & l_{Db} & l_{Dc} & \vdots & l_{Df} & l_{DD} & l_{DQ} \\ l_{Qa} & l_{Qb} & l_{Qc} & \vdots & l_{Qf} & l_{QD} & l_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

Où :

L_{ij} ($i=a,b,c,f,D,Q$; $j=a,b,c,f,D,Q$) est une self inductance si $i=j$ ou une inductance mutuelle entre i et j autrement.

Les signes négatifs des courants dans les enroulements du stator sont dus à la direction adoptée ou choisie.

1.6.2 Transformation de Park

la transformation de Park proposée initialement en 1929 (Eremia & Bulac 2013), consiste à remplacer les trois enroulements du stator a,b,c par trois enroulements rotorique fictives appelées $d,q,0$ (système de coordonnée rotorique). (Voir figure 1.14) :

- Les enroulements disposés sur les axes- d et q rotent ensemble avec le rotor et dans ce cas aucun couple mutuel n'existe entre eux.
- L'axe- 0 est indépendant de l'axe- d et de l'axe- q

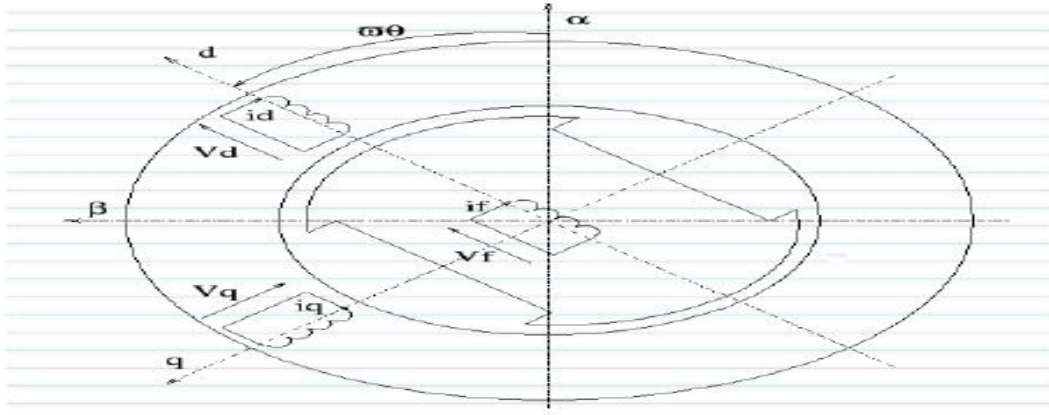


FIGURE 1.14 – Machine synchrone dans le repère de Park :(Oubidar & Bendaoud 2010)

Cette transformation permet d'obtenir des équations plus simples en utilisant les composantes d,q,0 à la place des grandeurs de phase a,b,c.

1.6.3 Les équations de Park pour le générateur synchrone

La transformation de Park permettant d'obtenir les équations plus simples en fonction des composantes (d, q, 0) consiste à appliquer une transformation inverse sur les matrices des courants, des tensions et des flux de liaisons du stator évoqués précédemment. La transformation de Park du système a,b,c au système d, q,0 est donnée par :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Avec [P] :la matrice de passage du système de coordonnée (a, b ,c) au système de coordonnée (d ,q ,0).

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

1. Equations des tensions du stator dans le modèle dq0

Considérons l'équation matricielle des tensions du stator donnée par l'équation (1.3)

$$[V_s] = -R [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s]$$

En appliquant la transformation de Park à l'équation matricielle des tensions du stator précédente, on obtient :

$$[V_P] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} + \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

avec :

$$[V_P] = [P] [V_S]$$

les équations des tensions du stator dans le modèle dq0 sont donc données par :

$$\begin{cases} V_d = -RI_d - \Psi_q \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Psi_d}{dt} \\ V_q = -RI_q + \Psi_d \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Psi_q}{dt} \\ V_0 = -RI_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} \end{cases} \quad (1.8)$$

où :

V_d, V_q sont les tensions induit sur les axe-d et q ;

I_d, I_q sont les courants sur les axes-d et q respectivement ;

Ψ_d, Ψ_q et Ψ_0 sont les flux des liaisons des enroulements sur les axes d,q et 0 ;

$\frac{d\theta}{dt} = \omega$ est la vitesse angulaire du rotor.

1. Equations de tensions du rotor dans le modèle dq0 [17]

Les équations de tensions du circuit rotorique demeure inchangées par la transformation de Park. Elles sont données par :

$$\begin{cases} V_f = R_f I_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = R_D I_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\ 0 = R_Q I_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \end{cases} \quad (1.9)$$

où :

V_f est la tension du champ d'enroulement ;

R_f est la résistance du champ d'enroulement ;

R_D, R_Q sont les résistances des enroulements amortisseurs.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière précise les généralités sur les machines synchrones. Il en ressort que ces machines fonctionnent indifféremment en générateur ou en moteur et une des particularités de ces machines est leur capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques. On note pour ce qui est des applications qu'à l'heure actuelle une grande partie de l'énergie électrique est produite par les machines synchrones dans différents centrales de production. Lors de son fonctionnement à l'état dynamique, la machine synchrone est décrite par des équations différentielles. Dans le chapitre suivant, il sera question pour nous de présenter les méthodes d'étude des systèmes dynamique, ce qui permettra de faire une analyse de la stabilité du générateur synchrone pendant son fonctionnement ; Les outils mathématiques nécessaires pour faire l'étude analytique et numérique des systèmes obtenus et les concepts électroniques associés seront également présentés.

METHODES D'ETUDE ET APPROCHE ELECTRONIQUE DES
SYSTEMES DYNAMIQUES

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les généralités sur la machine synchrone et quelques équations de base qui régissent son fonctionnement dans l'état dynamique. Cette dynamique est notamment formulée en termes d'équations mathématiques. Les systèmes dynamiques ainsi obtenus requièrent des outils théoriques pour leur analyse. Dans ce chapitre, nous allons introduire les méthodes et les outils théoriques indispensables dans la détermination et l'analyse des caractéristiques des systèmes dynamiques ; Nous présenterons sommairement les notions liées aux systèmes dynamiques, la notion de linéarité et de nonlinéarité, de stabilité et enfin les outils et méthodes d'approche électronique.

2.1 But et principe de la modélisation des systèmes des puissances

Dans notre contexte modéliser c'est convertir un problème concret, issu du monde réel, en un problème de nature mathématique, physique ou plus spécifiquement électronique. Un modèle mathématique est un ensemble d'équations mathématiques qui mettent en relation

*Un ensemble de **variables** qui sont les états du système étudié.

*Un ensemble de **paramètres** qui sont des constantes spécifiques liées au système

Nous pourrions distinguer entre autre la constante de temps en circuit ouvert de l'axe-d en régime transitoire, la réactance synchrone sur l'axe-d, la réactance transitoire sur l'axe-d, la puissance mécanique, etc.

En fin un ensemble de **contraintes**

Face à ces grandeurs caractéristiques, il devient donc possible, d'analyser l'évolution des paramètres du processus étudié. Le modèle ne remplacera pas le système réel mais, il sera vu comme un outil de substitution permettant de mieux appréhender une partie des phénomènes mis en jeu pendant la dynamique du système.

Les systèmes intervenant dans notre étude seront à modèles déterministes. Son principe de modélisation commence par la description du problème à étudier, suivit de sa mise en équation différentielle sous différentes hypothèses. Son étude est réalisée par des techniques mathématiques et des méthodes numériques de simulation à fin de parvenir à une interprétation du

comportement du système par rapport aux paramètres identifiés et estimés : Strogatz (1994).

2.2 Description des systèmes dynamiques

Ces systèmes dynamiques sont en général représentés par des systèmes d'équations différentiels, discrets ou à dérivées partielles. Ces systèmes sont en général non linéaires. Leurs études imposent la maîtrise des outils mathématiques relevant de l'analyse des systèmes d'équations différentiels non linéaires. Parmi les résultats classiques déjà démontrés, les notions suivantes sont essentielles.

2.2.1 Définition d'un système dynamique

En mathématique, en physique théorique en biologie et en ingénierie un **système dynamique** est un système classique qui évolue au cours du temps de façon à la fois

- **causale**, c'est-à-dire que son avenir ne dépend que de phénomènes du passé ou du présent ;
- **déterministe**, c'est-à-dire qu'à une condition initiale donnée à l'instant présent, va correspondre à chaque instant ultérieur un et un seul état futur possible.

On exclut donc ici conventionnellement les systèmes bruités intrinsèquement stochastiques, qui relèvent de la théorie des probabilités

L'évolution déterministe du système dynamique peut alors se modéliser de deux façons distinctes :

- une évolution **continue** dans le temps, représentée par une équation différentielle ordinaire. C'est a priori la plus naturelle physiquement, puisque le paramètre temps nous semble continu.
- une évolution **discontinue** dans le temps. Ce second cas est souvent le plus simple à décrire mathématiquement, même s'il peut sembler a priori moins réaliste physiquement. Cependant, l'étude théorique de ses modèles discrets est fondamentale, car elle permet de mettre en évidence des résultats importants, qui se généralisent souvent aux évolutions dynamiques continues : Strogatz (1994), Delignieres (2010).

2.2.2 Système dynamique différentiel

Depuis les travaux d'Isaac Newton (1687) l'idée que l'évolution temporelle d'un système physique quelconque est bien modélisée par une équation différentielle (ou ses généralisations à la théorie des champs, les équations aux dérivées partielles) est admise. Cette modélisation différentielle s'est depuis étendue avec succès à d'autres disciplines comme la biologie, la chimie, l'économie... Strogatz (1994)

On considère typiquement un système différentiel du premier ordre du type :

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X, \alpha, t) \\ X(0) = \bar{X} \end{cases} \quad (2.1)$$

où :

X est un vecteur de variables de dimension n ,

F un vecteur de fonctions scalaires des variables X de dimension n aussi,

α un vecteur de paramètres de dimension p , et t la variable libre du problème.

t est souvent le temps, mais cela n'a rien d'obligatoire. \bar{X} est le vecteur des conditions initiales (valeur de X à $t = 0$).

Suivre la dynamique du système correspond alors à observer l'évolution du vecteur X dans un espace vectoriel ε appelé espace des phases. L'application qui fait passer un vecteur de ε à un autre au cours du temps est appelé flot : Fotsin (2007).

2.2.3 Systèmes dynamiques linéaires et non linéaires

Systèmes dynamiques linéaires

Un système est dit linéaire lorsque le flot dynamique qui le caractérise est une application linéaire. Les systèmes mécanique, électrique, thermiques... sont parfois dits régulier car ils sont régis par des équations matricielles

$$a \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx = 0 \quad (2.2)$$

$$a \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx = f(t) \quad (2.3)$$

avec :

$$x^T = (x_1, \dots, x_n); f(t)^T = (f_1(t), \dots, f_n(t)); a, b, c : \text{matrice}(n, n) \text{ constantes}$$

Systèmes dynamiques non linéaires

La non-linéarité renvoie d'une manière générale à une rupture de la proportionnalité des causes et des conséquences : Delignieres (2010) c'est dire qu'un système est non linéaire dès que les équations qui le gouvernent ne sont plus des fonctions linéaires de $x(t)$. Rappelons que les systèmes non linéaires sont en général représentés par une équation à dérivée ordinaire (EDO) de la forme :

$$a \left(\frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right)^l + b \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^l + cx^n = f(t) \quad (2.4)$$

Où :

a, b, c , et d ne sont pas forcément des constantes et $f(t)$ est une excitation extérieure.

En général, la résolution de cette équation est très difficile et parfois impossible; l'on a donc recours à de techniques numériques, des méthodes de la perturbation, des méthodes variationnelles, des méthodes mathématiques comme celle de Lindstedt-Poincaré, de la moyenne, de la balance des harmoniques, des échelles de temps multiples : Nana (2010). Il revient souvent à faire une analyse qualitative des trajectoires dans l'espace de phase. Pour cela on détermine les points fixes et on procède à une linéarisation de l'équation différentielle autour de chacun

d'eux (cas d'une non linéarité cubique) pour un problème général d'un système à deux degrés de liberté mais seulement cette méthode ne nous permet pas de déterminer les dynamiques de parcours de ces trajectoires.

2.2.4 Stabilité d'un système linéaire régulier libre

D'une façon générale considérons un système dynamique dans \mathbb{R}^2 décrit par l'équation

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) \tag{2.5}$$

Où : $x \in \mathbb{R}^2$ et A est une matrice à coefficients constants

Nous supposons ici que la matrice A est régulière et que O est le seul point d'équilibre : Kofane (2011).

- i. A possède deux valeurs propres λ_1 et λ_2 réelles alors O : sera un noeud stable (attractif) si $\lambda_1 < \lambda_2 < 0$; ou un noeud instable (répulsif) si $0 < \lambda_1 < \lambda_2$ ou alors un col (point selle) pour $\lambda_1 < 0 < \lambda_2$
- ii. A possède deux valeurs propres complexes dont la partie réelle commune aux deux valeurs propres est noté α ; alors O sera un centre si $\alpha = 0$; ou un foyer attractif (point focal stable) si $\alpha < 0$; ou alors un foyer répulsif (point focal instable) pour $\alpha > 0$.
- iii. A admet une valeur propre double β (forcement réelle) : alors O sera un puit (noeud stable) si $\beta < 0$ et β non oscillatoire; ou une source si $\beta > 0$ et β non oscillatoire; ou O est un noeud impropre stable (attractif) si $\beta < 0$ et β oscillatoire; enfin O est noeud impropre instable (répulsif) si $\beta > 0$ et β oscillatoire.

2.2.5 Stabilité d'un système non linéaire

La stabilité d'un système dynamique d'équations différentielles non linéaires s'étudie autour des points fixes. Si un point fixe est stable, alors le système dynamique est stable autour de ce point.

- Recherche des points fixes

D'une façon générale si nous considérons un système dynamique autonome à temps continu décrit ainsi qu'il suit :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n, c_1) \\ \frac{dx_2}{dt} = F_2(x_1, x_2, \dots, x_n, c_2) \\ \vdots \\ \frac{dx_n}{dt} = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n, c_n) \end{cases} \tag{2.6}$$

Dans cette équation :

x_1, x_2, \dots, x_n représentent les variables d'état du système,

$\frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}, \dots, \frac{dx_n}{dt}$ représentent les variations temporelles des variables du système,

F_1, F_2, \dots, F_n représentent les fonctions des variables d'état,

c_1, c_2, \dots, c_n sont des constantes.

On appelle points d'équilibres ou encore points fixes : l'ensemble des points (x_1, x_2, \dots, x_n) pour lesquels le système n'évolue plus dans le temps.

En d'autres termes, les solutions sont stationnaires. Cet état est déterminé en supposant que toutes les dérivées temporelles sont nulles. C'est-à-dire : $\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \dots = \frac{dx_n}{dt} = 0$ [23]

- Stabilité des points fixes et théorèmes associés

Les systèmes non linéaires présentent des comportements périodiques ; pseudo périodiques où chaotique que l'on peut chercher à estimer. La méthode de linéarisation permet d'approximer une périodicité de l'évolution de la trajectoire. Le principe de cette méthode repose comme son nom l'indique sur la linéarisation du système non linéaire décrit autour du point d'équilibre. Pour cela, on décompose le système selon la formule de Taylor autour de chaque point d'équilibre.

Soit $\vec{X}_e(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ne})$ le point d'équilibre obtenu après résolution du système
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = 0 \end{cases}$$

Le point d'équilibre autour duquel la perturbation est considérée, prendra une nouvelle expression, s'écrivant sous la forme :

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_e + \vec{u} \tag{2.7}$$

En substituant (2.7) dans le système (2.6) et en procédant au développement limité nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = F_1(\vec{X}_e) + \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_{1e}} u_2 + \dots + \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_{1e}} u_n \\ \dot{u}_2 = F_2(\vec{X}_e) + \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_{1e}} u_2 + \dots + \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_{1e}} u_n \\ \vdots \\ \dot{u}_n = F_n(\vec{X}_e) + \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_{1e}} u_2 + \dots + \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_{1e}} u_n \end{cases} \tag{2.8}$$

(2.6) s'écrit alors :

$$\dot{\vec{u}} = \vec{F}'(\vec{X}_e) + A \vec{u} \tag{2.9}$$

Sachant que $\vec{F}'(\vec{X}_e) = \vec{0}$ il vient :

$$\dot{\vec{u}} = A \vec{u} \tag{2.10}$$

La forme matricielle de la matrice jacobienne A calculée au point d'équilibre $\vec{X} = \vec{X}_e$ s'écrit alors :

$$A = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{array} \right]_{\vec{X}=\vec{X}_e} \tag{2.11}$$

\vec{u} est la nouvelle variable locale qui va permettre de décrire la dynamique du système au voisinage du point d'équilibre. La stabilité du nouveau système linéaire obtenue est étudiée en recherchant les valeurs propres de la matrice A [23].

Les théorèmes mathématiques associés sont les suivantes :

Théorème 1 (Poincaré-Lyapunov)

- a) \vec{X}_e est un point d'équilibre stable si toutes les valeurs propres de la matrice A sont à partie réelle strictement négative.
- b) \vec{X}_e est un point d'équilibre instable si au moins une des valeurs propre de la matrice A est à partie réelle strictement positive.

Théorème 2 (Routh-Hurwitz) fotsin (2007)

Le polynôme caractéristique $p(\lambda)$ associé à la matrice A précédente est définit par :

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I_n)$$

Et l'équation caractéristique est donnée par :

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + a_{n-2} \lambda^{n-2} + \dots + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda^1 + a_0 = 0 \tag{2.12}$$

où les λ_i sont les solutions de l'équation (2.12) et représentent les valeurs propres de la matrice analytique.

Le théorème de stabilité de Routh-Hurwitz se base d'une part sur le signe de a_i , $i \in [1,n] \cap \mathbb{N}$ et, d'autre part, sur le signe d'un certain nombre de déterminants. Pour qu'un point d'équilibre décrivant l'équation (2.6) soit stable, il faut que les deux critères suivants soient vérifiés :

- Tous les a_i , $i \in [1,n] \cap \mathbb{N}$ doivent être de même signe et non nuls.
- a_i , $i \in [1,n] \cap \mathbb{N}$. sont positifs, il faut calculer les éléments du tableau de Routh-Hurwitz. La condition nécessaire et suffisante de stabilité selon Routh-Hurwitz est que tous les coefficients de la première colonne du tableau soient de même signe.

TABLE 2.1 – Tableau de Routh-Hurwitz.

λ^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
λ^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
λ^{n-2}	A_1	A_2	A_3
λ^{n-3}	B_1	B_2	B_3
....
λ^2	M_1	M_2	M_3
λ^1	N_1	N_2	N_3
λ^0	Z_1	Z_2	Z_3

Avec :

$$A_1 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}; A_2 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix}; A_3 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-6} \\ a_{n-1} & a_{n-7} \end{vmatrix};$$

$$B_1 = -\frac{1}{A_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & A_1 \\ a_{n-2} & A_2 \end{vmatrix}; B_2 = -\frac{1}{A_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & A_1 \\ a_{n-5} & A_3 \end{vmatrix}; Z_1 = -\frac{1}{N_1} \begin{vmatrix} M_1 & N_1 \\ M_2 & N_2 \end{vmatrix};$$

2.3 Principe de réalisation des systèmes dynamique des différents modèles du générateur synchrone

2.3.1 Modèle électromécanique du générateur synchrone : équation d’oscillation

L’équation d’oscillation du générateur synchrone est l’équation différentielle qui décrit l’accélération (décélération) du générateur synchrone et la turbine dû à tout déséquilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = c_a^a = c_m^a - c_e^a \tag{2.13}$$

avec :

J : le moment d’inertie conjugué de la masse en rotation en kg.m².

ω_m : la vitesse angulaire du rotor en radian mécanique par seconde (mech.rad/s)

c_a^a : le couple d’accélération en N*m ; c_m^a : le couple mécanique en N*m ; c_e^a : le couple électromagnétique en N*m ; et t le temps en seconde (s).

L’expression du moment d’inertie J en fonction de la constante d’inertie H est donnée par :

$$J = \frac{2HS_b}{\omega_{0m}^2} \tag{2.14}$$

Avec :

S_b : la puissance de base en (VA) ; ω_{0m} : la contribution de la vitesse angulaire du rotor en mech.rad/s

En remplaçant J dans l'équation (2.13) on obtient :

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = \frac{c_m^a - c_e^a}{s_b / \omega_{0m}} \quad (2.15)$$

du membre de gauche de l'équation (2.15), on considère que : $\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\omega_r}{\omega_0}$

Avec : ω_r la vitesse angulaire du rotor en el.rad/s ;

Le membre de droite de l'équation (2.15) représente la différence entre les couples mécanique et électromagnétique qui est approximativement égal à la différence entre la puissance mécanique d'entrée (P_m) et la puissance électrique de sortie (P_e).

De l'équation (2.15) on a donc :

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = c_m - c_e \approx P_m - P_e$$

c_m et c_e sont les couples mécanique et électromagnétique respectivement.

En posant :

$$\omega = \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\omega_r}{\omega_0} - 1 \quad (2.16)$$

l'équation (2.15') devient :

$$2H \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_e \approx P_m - P_e \quad (2.17)$$

l'équation (2.17) représente l'équation du mouvement per unit (p.u)

L'angle δ donnant la position du rotor à un instant t est défini par : $\delta = \delta_0 + (\omega_r - \omega_0)t$

avec : δ_0 sa valeur à t = 0.

il résulte donc que : $\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0$

$$\Rightarrow \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega \quad (2.18)$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0 \cdot \frac{C_m - C_e}{2H}$$

D'ici, nous obtenons une nouvelle forme de l'équation du mouvement qui est donnée sous la forme :

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = C_m - C_e \approx P_m - P_e \quad (2.19)$$

En additionnant le terme du couple amorti aux équations (2.17) et (2.19) on obtient respectivement :

$$2H \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e \quad (2.20)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = C_m - C_e \approx P_m - P_e$$

Où D représente le coefficient d'amortissement.

L'intervalle de temps dans lequel le générateur commence à s'arrêter avec la vitesse synchrone ω_0 lorsque le couple d'accélération est égal à un ($C_a=1$) est appliqué, est défini comme étant le début mécanique du générateur. Il est noté M et est défini par : $M=2H$

Le modèle électromécanique du générateur synchrone per unit (p.u) est ainsi donné par les équations différentielles suivantes encore appelées : **équations d'oscillations**

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega \end{cases} \quad (2.21)$$

Ou :

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = C_m - C_e \approx P_m - P_e \quad (2.21')$$

Ce modèle est aussi connu comme le **modèle d'ordre-2** puisqu'il contient deux équations différentielles de premier ordre : (Eremia & Bulac 2013) .

2.3.2 Approche électromagnétique de la machine synchrone

Dans cette section, on développe uniquement le modèle électromagnétique simplifié puisque les équations de base du modèle électromagnétique de la machine synchrone ont déjà été évoquées plus haut.

générateur synchrone avec uniquement le champ d'enroulement du rotor

Dans ce cas particulier, les équations de Park du générateur synchrone exprimée per unit deviennent :

$$V_d \approx -\omega_0 \Psi_q \quad (2.22)$$

$$V_q \approx \omega_0 \Psi_d \quad (2.23)$$

$$\Psi_d = -L_d I_d + L_{md} I_f \quad (2.24)$$

$$\Psi_q = -L_q I_q \quad (2.25)$$

$$\Psi_f = -L_{md} I_d + L_f I_f \quad (2.26)$$

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \Rightarrow \frac{d\Psi_f}{dt} = V_f - R_f I_f \quad (2.27)$$

avec :

L_f : l'inductance du champ d'enroulement.

L_{md} : l'inductance mutuelle entre le champ d'enroulement f et l'enroulement fictif de l'axe-d.

En substituant l'expression de Ψ_q donnée par (2.25) dans l'équation (2.22) on obtient :

$$V_d = X_q I_q \quad (2.28)$$

avec : $X_q = \omega_0 L_q$ la réactance synchrone sur l'axe-q.

En procédant de la même manière, on trouve que :

$$V_q = -X_d I_d + E_{1q} \quad (2.29)$$

avec :

$X_d = \omega_0 L_d$ la réactance synchrone sur l'axe-d.

E_{1q} : la f.é.m proportionnelle au champ de courant définie par :

$$E_{1q} = X_{md} I_f \quad (2.30)$$

pour $X_d = 0$ (pas de charge), on a : $V_q = E_{1q}$ dans ce cas E_{1q} est la tension en circuit ouvert ou f.é.m du circuit.

De l'équation (2.26) et (2.24) on retrouve que :

$$\Psi_d = -L_d + \frac{L_{md}}{L_f} \Psi_f \quad (2.31)$$

En substituant (2.31) dans l'équation (2.23) on obtient :

$$V_q = -X'_d I_d + E'_q \quad (2.32)$$

avec :

$$X'_d = \omega_0 L'_d = \omega_0 \left(L_d - \frac{L_{md}^2}{L_f} \right); E'_q = \omega_0 \frac{L_{md}}{L_f} \Psi_f \quad (2.33)$$

X'_d est la réactance transitoire sur l'axe-d ; et E'_q est la f.é.m proportionnelle au flux de liaison du circuit du rotor.

En égalant les expressions de V_q (2.23) et (2.32) on obtient la relation entre E_{1q} et E'_q :

$$E_{1q} = (X_d - X'_d) I_d + E'_q \quad (2.34)$$

La variation dans le temps de la tension E'_q est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_f - E_{1q}}{T'_{d0}} \quad (2.35)$$

où : $T'_{d0} = \frac{L_f}{R_f}$ est la constante de temps transitoire de l'axe-d en circuit ouvert.

En remplaçant E_{1q} donnée par (2.34) dans cette dernière on obtient :

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_f - (X_d - X'_d) I_d + E'_q}{T'_{d0}} \quad (2.36)$$

les équations (2.35) et (2.36) sont appelées équations amorties du champ de flux, exprimant la variation du flux magnétique dans le champ d'enroulement sous l'influence de l'excitation (E_f) .

L'équation (2.36) peut encore se mettre sous la forme :

$$T'_d \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = \frac{X'_d}{X_d} E_f + \frac{X_d - X'_d}{X_d} V_q \quad (2.37)$$

où :

$$T'_d = T'_{d0} \frac{X'_d}{X_d} \quad (2.38)$$

est la constante de temps transitoire d'axe-d.

Le modèle simplifié (modèle d'ordre3) du générateur synchrone considéré avec uniquement l'existence du champ de l'enroulement dans le rotor (sans circuit amortisseur sur l'axe-d et l'axe-q) est utilisé dans l'analyse dynamique de la stabilité des petits signaux et dans l'étude de la stabilité transitoire.

Le modèle simplifié consiste aux équations suivantes :

a) L'équation différentielle définissant les composantes de la f.é.m transitoire E'_q :

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}}(E_f - (X_d - X'_d)I_d - E'_q) \quad (2.36)$$

b) Les équations d'oscillations (2.21) et (2.21') définissant les variables ω et δ :

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0\omega \end{cases} \quad (2.21)$$

Ou

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = C_m - C_e \approx P_m - P_e \quad (2.21')$$

Le système d'équation d'écrivant le **modèle d'ordre-3** est le suivant (Eremia & Bulac 2013) :

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \cong P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0\omega \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \{-E'_q + E_f - (X_d - X'_d)I_d\} \end{cases}$$

générateur synchrone avec un enroulement amortisseur dans l'axe-q

Pour compléter les paramètres d'équations développées dans le cas précédent (générateur synchrone sans circuit amortisseur) les équations de Park seront aussi écrits pour le circuit amortisseur Q dans l'axe-q. Ici, les équations de flux de liaison (Ψ_q) et (Ψ_Q) sont :

$$\begin{cases} \Psi_q = -L_q I_q + L_{mQ} I_Q \\ \Psi_Q = -L_{mQ} I_q + L_Q I_Q \end{cases} \quad (2.39)$$

avec : I_Q le courant du circuit amortisseur et I_q le courant de l'armature sur l'axe-q

L'expression de la tension V_d aux bornes de l'axe-d est donnée par les équations :

$$\begin{cases} V_d = X_q I_q + E_{1d} \\ V_d = X'_q I_q + E'_d \end{cases} \quad (2.40)$$

L'équation du circuit amortisseur Q dans l'axe-q est donnée par :

$$\begin{aligned} 0 &= R_Q I_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \\ \Rightarrow 0 &= E_{1d} + T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} \end{aligned} \quad (2.41)$$

où :

$X_q = \omega_0 L_q$ est la réactance synchrone de l'axe-q et

$$X'_q = \omega_0 L'_q = \omega_0 \left[L_q - \left(\frac{L_{mq}^2}{L_Q} \right) \right] \quad (2.42)$$

la réactance transitoire de l'axe-q

$$E_{1d} = -\omega_0 L_{mq} I_Q \quad (2.43)$$

est la tension proportionnelle au courant du circuit amortisseur.

$$E'_d = -\omega_0 \left(\frac{L_{mq}}{L_Q} \right) \Psi_Q \quad (2.44)$$

est la tension proportionnelle au flux de liaison du circuit amortisseur.

$$T'_{q0} = \frac{L_Q}{R_Q} \quad (2.45)$$

est la constante de temps transitoire en circuit ouvert du circuit amortisseur de l'axe-q.

L'équation différentielle donnant la variation de la tension E'_d avec le temps est donnée par :

$$T'_q \frac{dE'_d}{dt} + E'_d = \left(\frac{X_q - X'_q}{X_q} \right) V_d \quad (2.46)$$

Avec :

$$T'_q = T'_{q0} \frac{X'_q}{X_q} \quad (2.47)$$

la constante de temps transitoire de l'enroulement amortisseur de l'axe-q.

En éliminant V_d dans l'équation (2.46) on obtient une nouvelle équation donnée par :

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{q0}} \left[-E'_d + (X_q - X'_q) I_q \right] \quad (2.48)$$

L'équation (2.48) forme avec les équations (2.27) et (2.21) le modèle du générateur synchrone avec un enroulement amortisseur dans l'axe-q; ceci constitue le **modèle d'ordre-4** :(Eremia & Bulac 2013)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{q0}} \left[-E'_d + (X_q - X'_q) I_q \right] \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \left\{ -E'_q + E_f - (X_d - X'_d) I_d \right\} \\ M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega \end{array} \right. \quad (2.49)$$

Après cette analyse mathématique, il sera question par la suite d'appliquer le système dynamique à un système physique pouvant présenter une certaine réponse, fonction de différentes interactions. Il sera alors question d'analyser les entrées dans le système et d'évaluer la sortie.

Le comportement des entrées/sorties établissent un certain transfert, pouvant faire apparaître la fonction de transfert, le système physique prit dans cet aspect peut être assimilable à un système électronique, ayant à l'entrée des tensions d'entrées et à la sortie des tensions de sortie.

Dans cette logique, Nous approcherons ces systèmes à des systèmes électroniques équivalents.

2.4 Composant électronique mis en jeu dans les systèmes électroniques

L'intégration des systèmes d'équations différentielles peut être effectué en utilisant des opérateurs électroniques simples tels que : l'additionneur, le soustracteur, le multiplieur, le sommateur, l'intégrateur, le dérivateur,... Ces opérateurs sont représentés par des symboles dans plusieurs logiciels parmi lesquels MATLAB Simulink dont nous allons nous en servir et dans d'autres logiciels électroniques. Ces opérateurs sont obtenus après assemblage des composants tel que les résistors, les condensateurs, les amplificateurs opérationnels,... parmi lesquels PSPICE dont nous allons également nous en servir dans la suite. Ces opérateurs sont assemblés en blocs pour constituer entièrement la dynamique d'un système sous forme de bloc électronique.

2.4.1 Opérateur et symbole équivalent sur MATLAB Simulink.

a) La Constante.

Elle sera utilisée pour représenter les constantes dans une équation. Son symbole est le suivant :



FIGURE 2.1 – Symbole d'une constante dans simulink.

b) Le Gain.

Il sera utilisé pour représenter une constante multipliant un variable dans une équation. Son symbole est le suivant :



FIGURE 2.2 – Symbole du Gain dans simulink

c) Le Produit.

Il sera utilisé pour multiplier deux variables. Son symbole est le suivant :

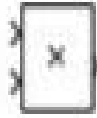


FIGURE 2.3 – Symbole du Produit dans simulink

d) Le Sommateur.

Il sera utilisé pour additionner plusieurs expressions. Son symbole est le suivant :



FIGURE 2.4 – Symbole du Sommateur dans simulink.

e) L'intégrateur.

Il sera utilisé pour intégrer une variable. Son symbole est le suivant :

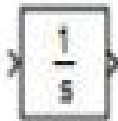


FIGURE 2.5 – Symbole d'un intégrateur dans simulink.

Principe de conversion des systèmes dynamique en système électronique

Les systèmes dynamique de puissance sont généralement représentés par des systèmes d'équations différentielles, lesquels pouvant avoir un modèle électronique équivalent. Pour avoir l'équivalent d'un système dynamique en électronique, on se sert généralement de l'ensemble d'équations qui décrivent la dynamique de ce système. Ces équations étant fonctions de plusieurs variables, on les modélisent individuellement avant de construire le système bloc électronique équivalent au système tout en considérant les différentes relations qui lient les variables du système. Dans les différents logiciels utilisés pour obtenir l'équivalent électronique d'un système d'équation, les constantes ainsi que les variables du système ont leurs équivalents dans les

dits logiciels ce qui permet d'obtenir l'équivalent électronique de chaque équation du système dynamique.

Principe de câblage dans SIMULINK

SIMULINK est l'extension graphique de MATLAB elle permet de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de schéma bloc. Pour ainsi câbler une équation dans simulink, il faut avoir la forme de l'équation et identifié les constantes et les différents vecteurs d'état (variables).

Ceci dit, pour une équation de la forme : $\dot{\omega} = -d\omega + cE'_d - bE'_q + a$

Le câblage dans MATLAB SIMULINK s'effectue comme suit :

1. Identifier les différents vecteurs d'états (variables) à savoir : $\omega, E'_q, et E'_d$
2. Les constantes d, c et b étant liés aux vecteurs d'états alors ils représentent des gains
3. La valeur a est remplacé par une constante (voir symbole d'une constante).

De ce fait, après intégration du vecteur d'état $\dot{\omega}$ à l'aide du symbole de l'intégrateur on obtient ω qui est ensuite utilisé pour sommer les différents termes de notre équation.

Équivalence dans Simulink d'une équation.

Considérons la première équation différentielle du modèle électromécanique du système (2.21). La dynamique de cet équation est donnée par :

$$M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e$$

En remplaçant la puissance électrique P_e par son expression donnée par :

$$P_e = E'_q I_q + E'_d I_d + (X'_d - X'_q) I_d I_q$$

Et en posant :

$$d = \frac{D}{M}; c = -\frac{I_d}{M}; b = \frac{I_q}{M}; a = \frac{1}{M} \{ P_m - (X'_d - X'_q) I_d I_q \}$$

L'équation précédente devient :

$$\dot{\omega} = -d\omega + cE'_d - bE'_q + a \tag{2.50}$$

Avec : E'_d, E'_q et ω des variables du temps.

De part la description faite ci-haut, le schéma bloc simulink équivalent à cette dernière équation dans le logiciel MATLAB SIMULINK est donné par :

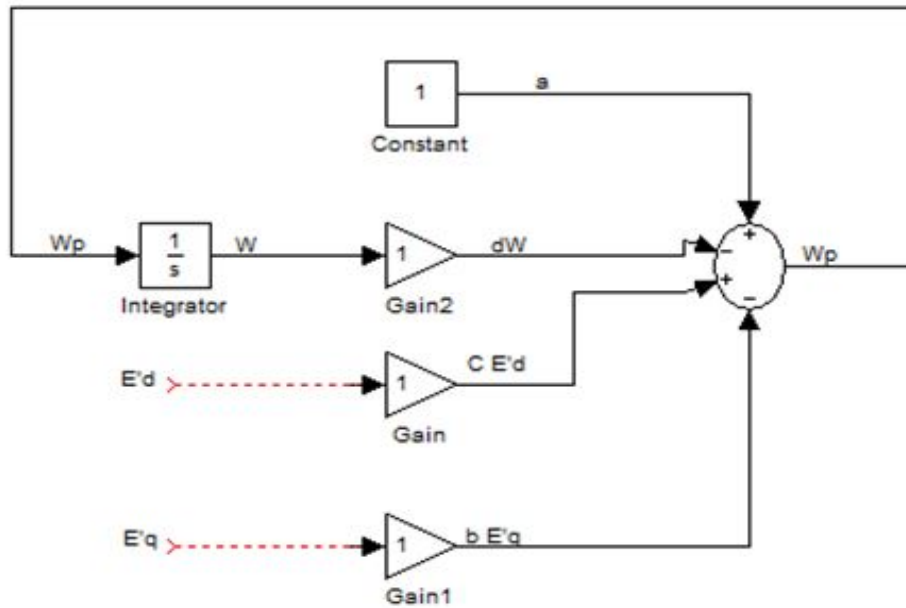


FIGURE 2.6 – Bloc simulink de l'équation (2.50)

Dans ce schéma bloc, la constante a est représentée par le symbole de la constante mentionné ci-haut. Les constantes d , c et b multipliant les variables de l'équation sont considérées comme des gains et sont remplacées également par le symbole équivalent du gain. Le symbole du sommateur permet lui de sommer les différents termes de l'équation qui représente enfaite $\dot{\omega}$ et qui est ensuite intégré à l'aide du symbole integrator afin d'obtenir ω

2.4.2 Analogie électronique dans ORCAD PSPICE.

L'implémentation en électronique nécessite la connaissance d'un certains nombres de composants et circuits électronique.

Symboles des composants

- **Le résistor.**

Un résistor est un composant passif qui régule le passage d'une certaine quantité de charges électriques dans un système conducteur. On le représente par l'un ou l'autre des symboles suivants :



FIGURE 2.7 – symboles d'un résistor

La grandeur caractéristique d'un résistor est sa résistance notée R , son unité est le Ohm (Ω).

- **Le condensateur.**

Un condensateur est un composant de filtrage dans les systèmes électronique qui intervient pour donner au système une certaine réponse en fonction du temps. La grandeur caractéristique d'un condensateur est la capacité noté C exprimée en farad (F). Son symbole normalisé est :



FIGURE 2.8 – Schéma du Symbole d'un condensateur.

- **La source de tension continue**

Elle est utilisée dans le logiciel Pspice pour remplacer les différentes constantes du système. Dans le dit logiciel, elle est représentée par le symbole suivant :

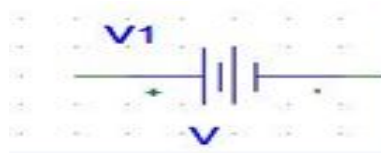


FIGURE 2.9 – schéma d'une source de tension continue

Montage de quelques circuits électroniques avec l'amplificateur opérationnel

- **L'amplificateur opérationnel.**

Un amplificateur opérationnel (A.O), est un dispositif électronique permettant d'obtenir à partir des tensions d'entrées, une tension de sortie spécifique. Son symbole normalisé est illustré sur la figure :

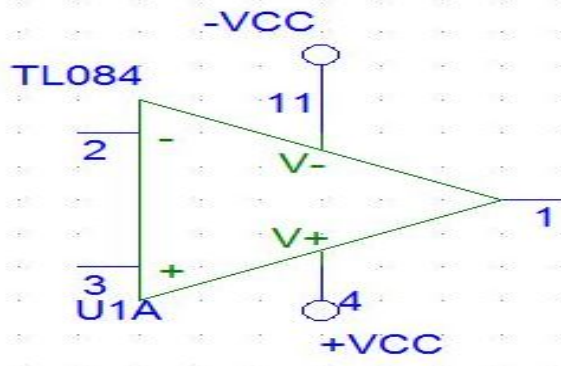


FIGURE 2.10 – Symbole de l'amplificateur opérationnel(le TL084).

L'amplificateur opérationnel requiert une alimentation symétrique pour fonctionner ($-V_{cc}$; $+V_{cc}$).

- **Circuit amplificateur.**

C'est un système électronique délivrant une tension de sortie plus grande que celle de l'entrée
On le représente par la figure suivante :

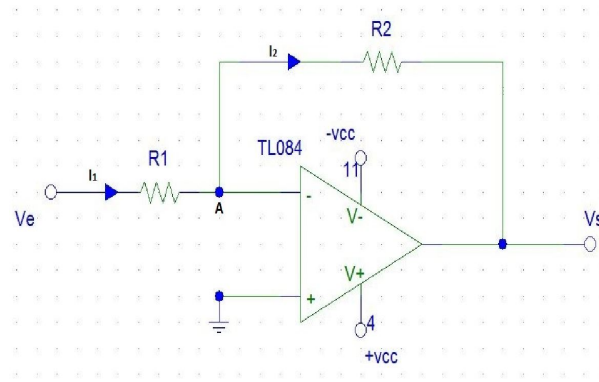


FIGURE 2.11 – Schéma du montage amplificateur

Le courant ne pouvant passer dans l'entrée inverseuse de l'amplificateur, on a d'après la loi des noeuds au point A ($i_1 = i_2$) et en utilisant la loi d'Ohm $i = \frac{V}{R}$ on a :

$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_s}{R_2} \Rightarrow V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e \quad (2.51)$$

avec : $R_1 \neq R_2$

- **Circuit amplificateur inverseur.**

C'est un système électronique qui offre une sortie se comportant comme l'inverse de l'entrée avec une amplitude proportionnelle.

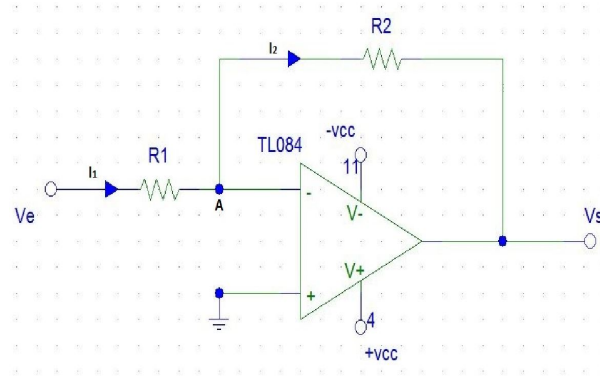


FIGURE 2.12 – Schéma du montage amplificateur inverseur

Le courant ne pouvant passer dans l'entrée inverseuse de l'amplificateur, on a d'après la loi des noeuds au point A $i_1 = i_2$ et en utilisant la loi d'Ohm $i = \frac{V}{R}$ on a :

$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_s}{R_2} \Rightarrow V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e \tag{2.52}$$

avec : $R_1 = R_2$

- **Circuit intégrateur.**

C'est un système électronique assimilable à l'équivalent d'un système dynamique linéaire à coefficient constant présenté au paragraphe (2.4). Sa représentation est donnée à la figure (2.13) :

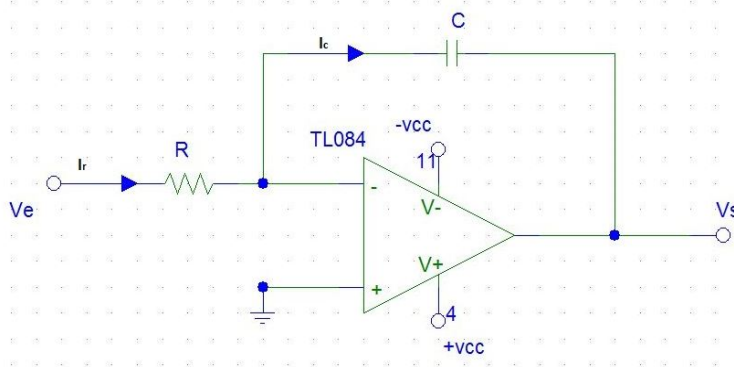


FIGURE 2.13 – Schéma du Montage intégrateur.

En appliquant les lois de Kirchhoff, on a :

$$\begin{aligned} i_r = i_c &\Rightarrow \frac{V_e}{R} = C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{dV_s}{dt} \\ &\Rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_e}{RC} \\ &\Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt \end{aligned} \tag{2.53}$$

- **Circuit sommateur**

C'est un système électronique à plusieurs tensions d'entrées, délivrant une tension de sortie fonction de la somme des intensités de courant provenant de chacune des branches des circuits d'entrées.

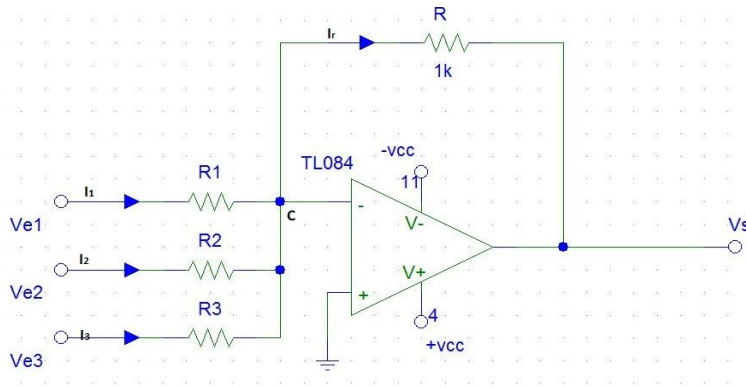


FIGURE 2.14 – Montage sommateur a trois entrées

D'après la loi des noeuds, au noeud C on a : $i_r = i_1 + i_2 + i_3$
 en utilisant la loi d'Ohm $i = \frac{V}{R}$ on a :

$$-\frac{V_s}{R} = \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

$$\Rightarrow V_s = -R \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \tag{2.54}$$

avec : $R_1 = R_2 = R_3 = R$

2.4.3 Principe de câblage dans Pspice.

Pour effectuer un câblage dans Pspice, on observe l'évolution temporelle des grandeurs du système faite avec l'analyse numérique (par exemple avec MATLAB) pour s'assurer qu'ils évoluent entre -12 et +12 dans le cas où les amplificateurs opérationnels sont polarisés entre -12v et +12v ou entre -15 et +15 dans le cas où les amplificateurs sont polarisés entre -15v et +15v.

Dans le cas où l'évolution de ces grandeurs n'est pas comprise entre -12 et + 12 ou entre -15 et +15, on addimensionne chaque grandeur pour avoir les nouvelles valeurs comprises entre les bornes de polarisation de l'amplificateur opérationnel.

Exemple d'approche électronique de la dynamique d'un système.

Considérons la première équation différentielle du modèle électromécanique du système (2.21) décrivant la variation temporelle de la vitesse angulaire du rotor définit par :

$$\dot{\omega} = -d\omega + cE'_d - bE'_q + a$$

Avec : E'_d , E'_q et ω des variables du temps ; d, c et b des gains et c une source de tension continue.

Le câblage de l'équation ci-dessus dans le logiciel Pspice s'effectue comme suit :

Après avoir respecté le principe de câblage défini ci-dessus, le montage de cette équation dans le logiciel ORCAD Pspice s'effectue à l'aide des éléments tels que :

- Le montage intégrateur : il permet d'obtenir ω à partir de $\dot{\omega}$
- Le montage amplificateur : qui permet de construire les gains d, c et b
- La source de tension continue : qui permet de représenter la constante c
- Le sommateur : qui permettra de sommer chaque terme
- Le montage inverseur : qui permet lui d'obtenir $+\omega$ à partir $-\omega$

Pour obtenir $\dot{\omega}$ nous devons sommer les quatre termes de droite de l'équation (2.50) pour cela nous allons utiliser le montage d'un circuit sommateur ; Puisque nous voulons obtenir ω en sortie nous devons intégrer la somme à droite de l'équation (2.50) et pour cela on aura besoin du montage d'un circuit intégrateur. Pour obtenir les valeurs des paramètres d, C et b, nous allons utiliser le montage des gains amplificateurs.

Le circuit électronique équivalent donc à cette équation est le suivant :

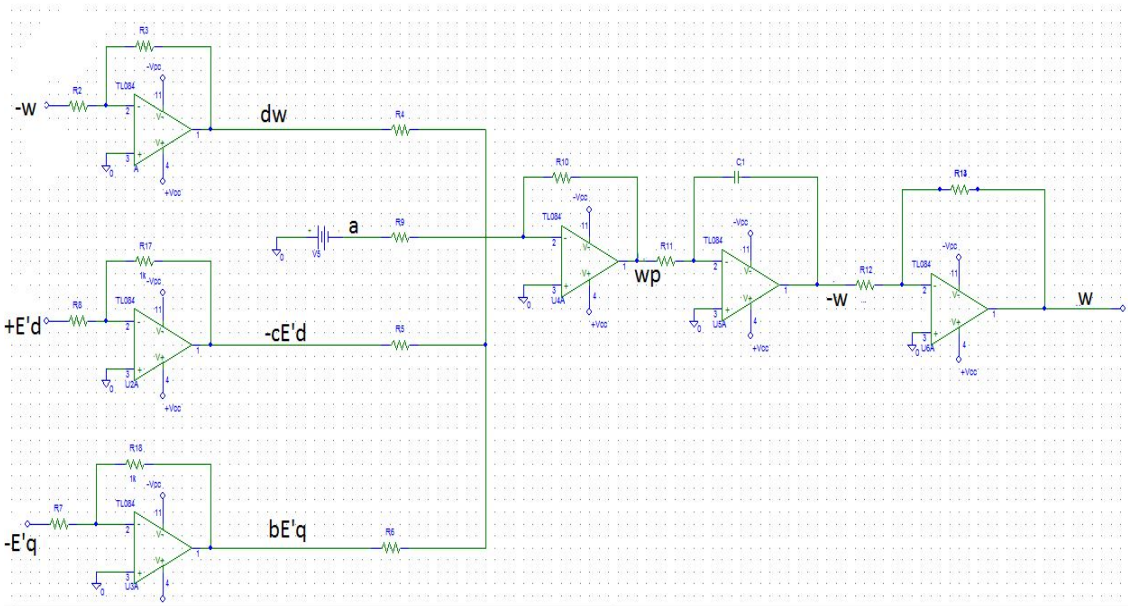


FIGURE 2.15 – schéma du circuit équivalent dans Pspice de l'équation (2.50)

Le câblage détaillé de cette équation a été effectué avec les composants mentionnés ci-haut. Les relations liant les différentes valeurs de ces composants sont les suivantes :

$$R_4 = R_5 = R_6 = R_9 = R_{10}; R_{12} = R_{13}$$

$$\frac{R_3}{R_2} = d; \frac{R_{17}}{R_8} = c; \frac{R_{18}}{R_7} = b$$

Au niveau du circuit intégrateur, la résistance R_{11} et le condensateur C_1 sont liés par la relation suivante : $\frac{k}{R_{11}C_1} = 1$

k étant le facteur d'adimensionnement du temps du passage du modèle mathématique au modèle électronique et qui permet de réduire les valeurs des résistances de l'ordre du kilohm ($k\Omega$) pour permettre de visualiser la sortie du circuit à l'oscilloscope. Dans notre câblage la constante a est remplacée par une source de tension continue.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon exhaustive, les techniques d'approche de résolution des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires en dégageant les outils et théorèmes mathématiques nécessaires. Il est ainsi dit qu'à chaque état du système est associé un vecteur X . Suivre le flot dynamique correspond alors à observer l'évolution du vecteur X dans un espace vectoriel E appelé espace de phase. L'intégration des systèmes dynamiques pouvant aussi être faite en utilisant des opérateurs électroniques, nous avons pour cette raison approché le problème des systèmes dynamiques par des implémentations électroniques. Les logiciels que nous utiliserons au prochain chapitre ont été brièvement présentés. Nous avons également présenté les différents modèles du générateur synchrone notamment les modèles simplifiés d'ordre-3 et d'ordre-4. Dans la suite de notre travail nous allons appliquer ces méthodes et outils théoriques pour l'étude analytique et numérique de la dynamique du générateur synchrone, cas du modèle d'ordre-4.

CIRCUIT ÉLECTRONIQUE DE L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU MODÈLE 4D D'UN GÉNÉRATEUR SYNCHRONE

Introduction

Parmi tous les équipements du réseau électrique, les générateurs d'électricité (notamment les générateurs synchrones) sont sans doute les équipements les plus importants et les plus coûteux. Leur état d'opération affecte directement la stabilité du réseau. La panne d'un générateur crée une perturbation au réseau local qui peut causer une interruption d'alimentation. La perte de production des générateurs représente aussi une perte de revenu pour les producteurs d'électricité. Donc plusieurs techniques dans le domaine de la protection des générateurs ont été développées pour assurer leur bon fonctionnement (Henderson, Lothian, & Priest, 1998 ; Pollock & Lyles, 1992).

Nous allons dans ce présent chapitre modéliser le système d'équation du modèle d'ordre-4 décrivant le fonctionnement du générateur synchrone dans l'état dynamique, ensuite faire une étude analytique et numérique du système. Nous allons concevoir à la fin le système électronique équivalent au modèle.

3.1 Modélisation

3.1.1 formulation et équations dynamiques du modèle d'ordre-4.

Le modèle d'ordre-4 du générateur synchrone fait intervenir quatre variables représentées chacune par une équation différentielle à savoir :

- ***L'équation du mouvement per unit du générateur synchrone***

Cette équation décrit l'accélération (décélération) du générateur synchrone et la turbine dû a tout déséquilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique. Cette équation est donnée par :

$$M \frac{d\omega}{dt} + D\omega = C_m - C_e \approx P_m - P_e$$

Le membre de droite de cette équation représentant la différence entre les couples mécanique et électromagnétique exprimée en p.u (per unit) est approximativement égal à la différence entre la puissance mécanique d'entrée et la puissance électrique de sortie.

Dans cette équation, C_m et C_e représente respectivement les couples mécanique et électromagnétique en p.u; P_m et P_e sont les puissances mécanique et électrique en p.u. D est le coefficient d'amortissement. il est déterminé à partir des données du modèle. M est donnée par : $M = 2H$ où H est la constante d'inertie.

En remplaçant P_e par son expression donnée par :

$$P_e = E'_d I_d + E'_q I_q + (X'_d - X'_q) I_d I_q$$

et en posant :

$$d = \frac{D}{M}; c = -\frac{I_d}{M}; b = \frac{I_q}{M}; a = \frac{1}{M} \{P_m - (X'_d - X'_q) I_d I_q\}$$

On obtient l'équation différentielle suivante :

$$\dot{\omega} = -d\omega + cE'_d - bE'_q + a \quad (3.1)$$

- **L'équation de la variation de l'angle donnant la position du rotor à un instant t**

Cette équation est donnée par l'expression :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega$$

Avec δ l'angle donnant la position du rotor à un instant t . ω_0 est une constante. Dans notre travail, ω_0 est égal à 0,1. . Cette équation différentielle peut encore s'écrire de la manière suivante :

$$\dot{\delta} = \omega_0 \omega \quad (3.2)$$

- **L'équation différentielle définissant les composantes de la force électromotrice transitoire sur l'axe en quadrature (axe-q)**

La variation dans le temps de la tension E'_q est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} \left[-E'_q + E_f - (X_d - X'_d) I_d \right]$$

où :

X'_d est la réactance transitoire sur l'axe direct (axe-d)

X_d la réactance synchrone sur l'axe-d

I_d est le courant induit sur l'axe-d

E_f est la force électromotrice du champ d'inducteur (l'excitation)

T'_{d0} est la constante de temps transitoire d'axe-d à circuit ouvert

En posant :

$$e = \frac{1}{T'_{d0}} \text{ et } f = \frac{1}{T'_{d0}} \{E_f - (X_d - X'_d) I_d\}$$

on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\dot{E}'_q = -eE'_q + f \quad (3.3)$$

- **L'équation différentielle définissant les composantes de la force électromotrice transitoire sur l'axe direct (axe-d)**

La variation dans le temps de la tension E'_d est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{q0}} \left\{ -E'_d + (X_q - X'_q) I_q \right\}$$

où :

X'_q est la réactance transitoire sur d'axe-q

X_q la réactance synchrone sur d'axe-q

I_q est le courant induit sur l'axe-q

E'_d est la fém transitoire sur l'axe-d

T'_{q0} est la constante de temps transitoire d'axe-q à circuit ouvert

En posant également :

$$g = \frac{1}{T'_{q0}} \text{ et } h = \frac{1}{T'_{q0}} \left\{ (X_q - X'_q) I_q \right\}$$

on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\dot{E}'_d = -gE'_d + h \quad (3.4)$$

En regroupant les équations (3.1), (3.2), (3.3) et (3.4) on obtient le système d'équations différentielles ordinaire décrivant le modèle d'ordre-4 suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega} = -d\omega + cE'_d - bE'_q + a \\ \dot{\delta} = \omega_0\omega \\ \dot{E}'_q = -eE'_q + f \\ \dot{E}'_d = -gE'_d + h \end{array} \right.$$

En posant :

$$\omega = x; \delta = y; E'_q = z; E'_d = w;$$

le nouveau système d'équations différentielles prend la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = a - bz + cw - dx \\ \dot{y} = \omega_0x \\ \dot{z} = -ez + f \\ \dot{w} = -gw + h \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Dans la suite de ce travail, nous allons étudier la dynamique de ce modèle avec les données classiques des paramètres du générateur synchrone suivantes :(Eremia & Bulac 2013),(Machowski et al. 2008) :

Le coefficient d'amortissement : $D = 0,05$

Le temps du début mécanique du générateur : $M = 0,7s$

Le courant induit sur l'axe-d : $I_d = -0,922pu$;

Le courant induit sur l'axe-q : $I_q = 0,428pu$;

La puissance mécanique du générateur : $P_m = 2pu$;

La réactance synchrone d'axe-d : $X_d = 1,6\text{pu}$;

La réactance synchrone d'axe-q : $X_q = 1,6\text{pu}$;

La réactance transitoire d'axe-d : $X'_d = 0,23\text{pu}$

La réactance transitoire d'axe-q : $X'_q = 0,38\text{pu}$

La f.é.m de l'enroulement f (l'excitation) : $E_f = 2,33\text{pu}$;

La constante de temps transitoire en circuit ouvert sur l'axe-d : $T'_{d0} = 5,773\text{pu}$

La constante de temps transitoire en circuit ouvert sur l'axe-q : $T'_{q0} = 1,768\text{pu}$

La contribution de la vitesse angulaire du rotor : $\omega_0 = 0,1$

Avec ces données, les constantes figurant dans notre système prennent des valeurs suivantes :

$$\begin{cases} d = 0,071428571; c = 1,317142857; b = 0,611428571; \\ \omega_0 = 0,100000000; e = 0,173220162; g = 0,565610859 \\ a = 2,772582286; f = 0,623443616; h = 0,295339366 \end{cases}$$

Cela passera d'abord par la détermination des points fixes et l'étude de leurs stabilités.

3.2 Etude de la stabilité du système

3.2.1 Détermination des points fixes du système (3.5)

Les points d'équilibre du système (3.5) sont obtenus lorsque toutes les dérivées temporelles sont nulles c'est-à-dire en résolvant le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} -dx + cw - bz + a = 0 \\ \omega_0 x = 0 \\ -ez + f = 0 \\ -gw + h = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$(3.6a) \Rightarrow -dx + cw - bz + a = 0$$

$$\Rightarrow x = 8,56w + 18,44z + 38,82$$

$$(3.6b) \Rightarrow x = 0$$

$$(3.6c) \Rightarrow z = \frac{f}{e} = 3.599$$

$$(3.6d) \Rightarrow w = \frac{h}{g} = 0,522$$

Il en ressort que le système (3.5) admet une **infinité de points d'équilibres** car pour chaque valeur de δ correspond un point d'équilibre.

En se référant au chapitre 2, la matrice Jacobéenne associée au système (3.5) est donnée par la

relation :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial z} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial w} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial z} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial w} \\ \frac{\partial \dot{z}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{z}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} & \frac{\partial \dot{z}}{\partial w} \\ \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} & \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} & \frac{\partial \dot{w}}{\partial w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d & 0 & -b & c \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g \end{bmatrix}$$

3.2.2 Etude de la stabilité du système

En considérant les valeurs des paramètres du système (3.5), la matrice Jacobéenne précédente s'écrit :

$$A = \begin{bmatrix} -0,071 & 0 & -0,611 & 1,317 \\ 0,100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,173 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,566 \end{bmatrix}$$

Le polynôme caractéristique $P(\lambda)$ associé à la matrice A est défini par :

$$P(\lambda) = \lambda^4 + 0,810\lambda^3 + 0,150\lambda^2 + 0,007\lambda$$

Avec : λ_i les valeurs propres associées à la matrice A.

on retrouve après résolution de l'équation caractéristique :

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0 \\ \lambda_2 = -0,071 \\ \lambda_3 = -0,173 \\ \lambda_4 = -0,566 \end{cases}$$

D'après le théorème 1 (poincaré-lyapunov) vu au chapitre2, le **système est stable** car toutes les valeurs propres de la matrice A sont négatives.

3.3 Simulation numérique du modèle d'ordre-4

Les résultats ci-dessous ont été obtenus par simulation numérique en utilisant l'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4 dans Matlab, pour un pas d'intégration numérique $h = 0.05$ et pour conditions initiales : $\omega_0 = 0$; $\delta_0 = 0.1$; $E'_{q0} = 1.073$; $E'_{d0} = -0.522$

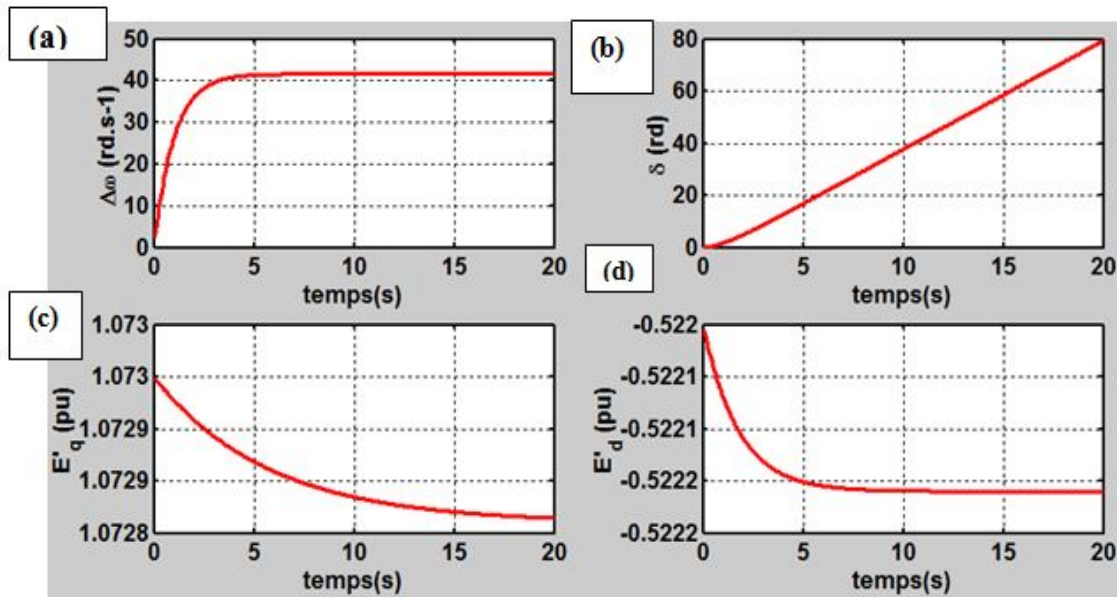


FIGURE 3.1 – évolution temporelle des variables du modèle avec pour condition initiales : $\omega_0 = 0$; $\delta_0 = 0.1$; $E'_{q0} = 1.073$; $E'_{d0} = -0.522$ à savoir : (a) de la vitesse angulaire du rotor ; (b) de l'angle donnant la position du rotor ; (c) de la f.é.m transitoire sur l'axe-q E'_q ; (d) de la f.é.m transitoire sur l'axe-d E'_d

INTERPRÉTATION :

- La figure (3.1a) donnant l'évolution temporelle de la vitesse angulaire du rotor montre que la vitesse angulaire du générateur synchrone pendant son fonctionnement à l'état dynamique croît pendant un interval de temps (dans l'intervall 0 à 5s) et atteint une valeur maximale ($t=5s$) à partir de laquelle elle commence à se stabilisée et tourne avec une vitesse constante. la croissance rapide de la vitess angulaire set dû au brusque démarrage du moteur
- La figure (3.1b) quant à elle montre l'évolution de l'angle donnant la positon du rotor à un instant t . ici, on constate que l'angle du rotor évolue de façon linéaire aucours du temps.cette courbe d'évolution dans le temps est une droite qui passe par l'origine des axes du repère. cette croissance linéaire est également dû au brusque démarage du moteur.
- La figure (3.1c) qui donne la variation de la f.é.m transitoire sur l'axe-q fait observer que la f.é.m E'_q décroît brusquement avec le temps avant de se stabiliser. cette décroissance brusque est causée par la tension d'excitation E_f
- Sur la figure (3.1d), donnant l'évolution temporelle de la f.é.m transitoire sur l'axe-d nous constatons également que la f.é.m E'_d décroît jusqu'à une valeur stable atteinte au bout de cinq secondes (5s).ceci montre que l'excitation à également une influence sur la f.é.m transitoire d'axe-q mais celle-ci est d'une courte durée car après cinq seconde la machine retrouve son état stable.

Nous constatons sur la base de notre modèle que, suite à une perturbation, le système de puissance peut être transitoirement stable. Le régime transitoire ne pourra durer que quelques secondes.

3.4 Approche électronique du système

Le système dynamique approché électroniquement permettra d'avoir le système électronique équivalent, capable de donner le même comportement dynamique. Nous nous proposons de réaliser ce travail dans MATLAB SIMULINK et PSPICE

3.4.1 approche Matlab simulink

En utilisant le principe de câblage décrit au chapitre précédent a chaque équation du système (3.5) décrivant le modèle d'ordre-4 et en y plaçant un oscilloscope à la sortie de chaque intégrateur, on visualise l'évolution temporelle de chaque variable du modèle. Ainsi, les équations de notre modèle définis par le système (3.5) dans le logiciel SIMULINK est décrit par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = a - bz + cw - dx \\ \dot{y} = \omega_0 x \\ \dot{z} = -ez + f \\ \dot{w} = -gw + h \end{array} \right.$$

Où :

b, c, d, ω_0 , e et g représentent des gains

a, f et h des constantes.

Ainsi, le schéma de montage du système (3.5) définissant le modèle d'ordre-4 du générateur synchrone dans le logiciel MATLAB SIMULINK est le suivant :

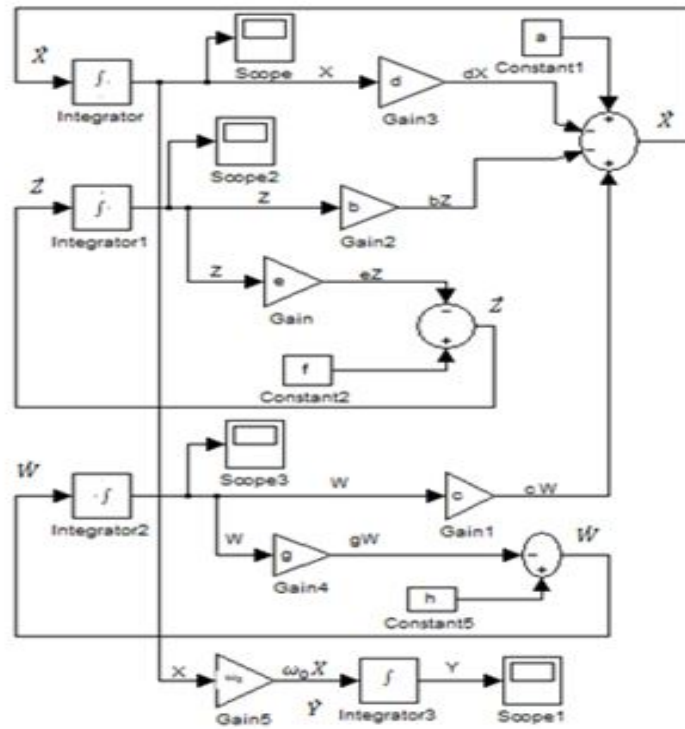


FIGURE 3.2 – schéma bloc simulink du système (3.5)

Le système électronique réalisé ci-dessus contient quatre oscilloscopes placés aux sorties des variables X, Y, Z et W. les résultats de la simulation de ce système électronique dans MATLAB SIMULINK pour une durée de 20s et un pas d'intégration $h = 0.05$ nous donne les courbes suivantes :

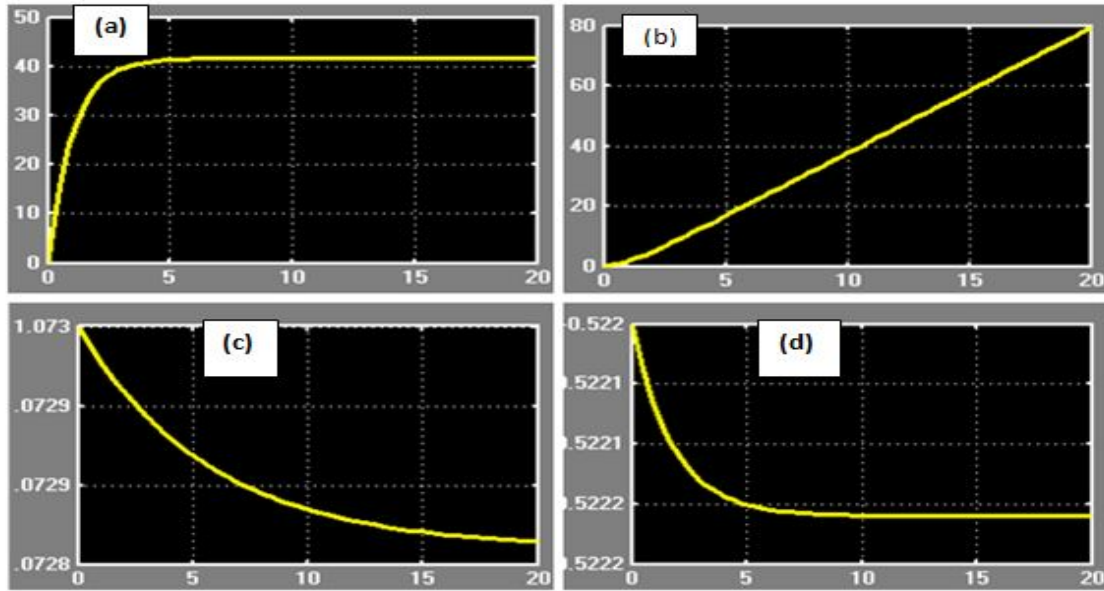


FIGURE 3.3 – évolution temporelle des variables du modèle avec pour condition initiales : $\omega_0 = 0$; $\delta_0 = 0.1$; $E'_{q0} = 1.073$; $E'_{d0} = -0.522$ à savoir : (a) de la vitesse angulaire du rotor ; (b) de l'angle donnant la position du rotor ; (c) de la f.é.m transitoire sur l'axe-q E'_q ; (d) de la f.é.m transitoire sur l'axe-d E'_d

Comparaison des résultats

Ici nous comparons les résultats obtenues par analyse numérique et simulink en les plaçant côte à côte.

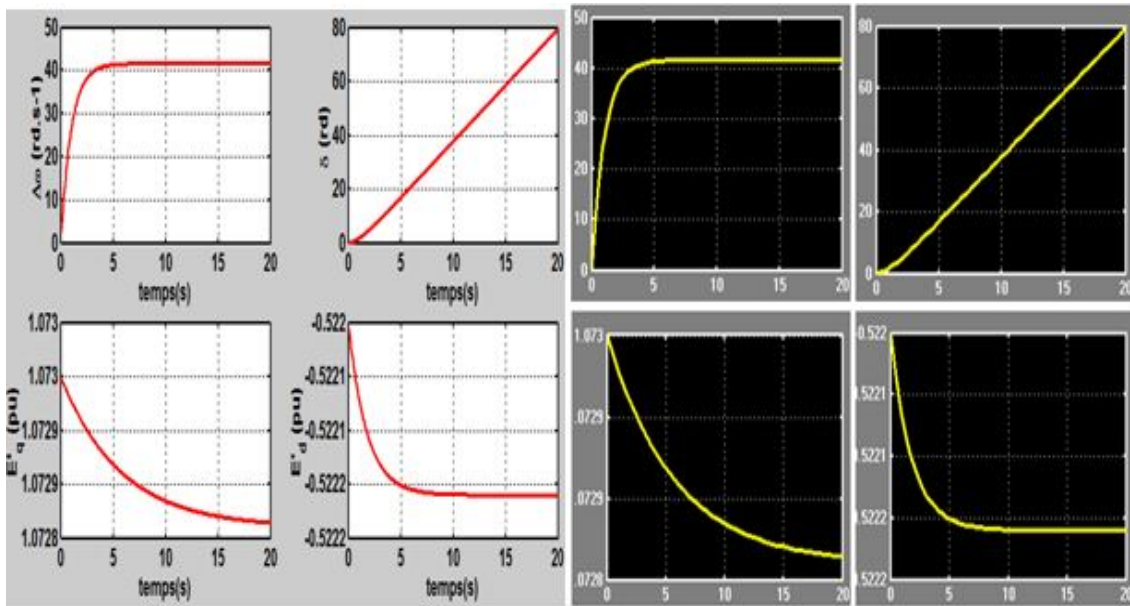


FIGURE 3.4 – comparaison des courbes obtenues par analyse numérique en rouge et celles obtenues par simulink en jaune.

La figure (3.3) décrit parfaitement le comportement des variables du système. Cette figure est en parfait accord avec la figure (3.1) donnant l'évolution temporelle des variables de notre modèle. Ces constats prouvent qu'il existe un équivalent électronique du système décrivant la dynamique du générateur synchrone (cas du modèle d'ordre-4) décrite par le système (3.5).

Cependant les considérations électroniques du bloc simulink ne fournissent pas des détails indispensables sur la nature et l'agencement des composants électroniques tel que les condensateurs, les résistances, les amplificateurs opérationnels,... jouant des rôles spécifiques dans la détermination des principales fonctions électronique du système. Pour y parvenir, le système bloc simulink doit être remplacé par le système bloc câblé dans ORCAD PSPICE.

La démarche conduisant à l'obtention d'un tel système est décrite dans le paragraphe suivant.

3.4.2 l'approche du système électronique par Pspice

Cette approche qui permet de réaliser le câblage, est une étude expérimentale se présentant comme une alternative indispensable et idéale pour le traitement des systèmes dynamiques non linéaires car non seulement elle nous permet de confirmer les résultats obtenus analytiquement et numériquement, mais elle résoud aussi les limites de ces méthodes (choix du pas d'intégration, durée de la phase transitoire). En effet, lorsque le circuit électronique est conçu et mis sous tension les signaux visualisés à l'oscilloscope présentent les étapes permanentes du système étudié, la durée de la phase transitoire étant tellement brève qu'elle échappe à la vue. Bien plus, le circuit électronique ne présente aucun problème lié au pas d'intégration. Notons que cette étude nécessite beaucoup de tact de la part de l'expérimentateur, car dans de nombreux cas interviennent certains effets (capacité parasite, tolérance de composantes etc...) qui sont ignorés par les autres approches. Notre étude expérimentale doit se restreindre à la mise en évidence de l'évolution temporelle des variables d'états de notre système dynamique. Les amplificateurs opérationnels sont des TL084 alimentés à $\pm 15V$.

En suivant les étapes décrites précédemment au chapitre 2 et d'après les simulations numériques faite dans le logiciel MATLAB, on observe que l'amplitude des grandeurs X et Y dépasse la valeur maximale des tensions de polarisation de l'amplificateur opérationnel (TL084). Ainsi, pour les ramener dans l'intervalle désiré de la tension de polarisation (-15V et +15V), nous avons effectué le changement de variable suivant :

$$X = \frac{x}{5}; Y = \frac{y}{8}; Z = z; W = w$$

Suite à cela, le système décrivant le modèle devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \dot{X} = a - bZ + cW - 5dX \\ 8 \dot{Y} = 5\omega_0 X \\ \dot{Z} = eZ + f \\ \dot{W} = -gW + h \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = \frac{a}{5} - \frac{b}{5}Z + \frac{c}{5}W - dX \\ \dot{Y} = \frac{5}{8}\omega_0 X \\ \dot{Z} = eZ + f \\ \dot{W} = -gW + h \end{array} \right.$$

En posant de nouveau :

$$A = \frac{a}{5}; B = \frac{b}{5}; C = \frac{c}{5} \text{ et } \Omega_0 = \frac{5}{8}\omega_0$$

le système devient :

$$\begin{cases} \dot{X} = A - BZ + CW - dX \\ \dot{Y} = \Omega_0 X \\ \dot{Z} = eZ + f \\ \dot{W} = -gW + h \end{cases}$$

Le câblage détaillé du système électronique équivalent à notre nouveau système est structurée de la manière suivante :

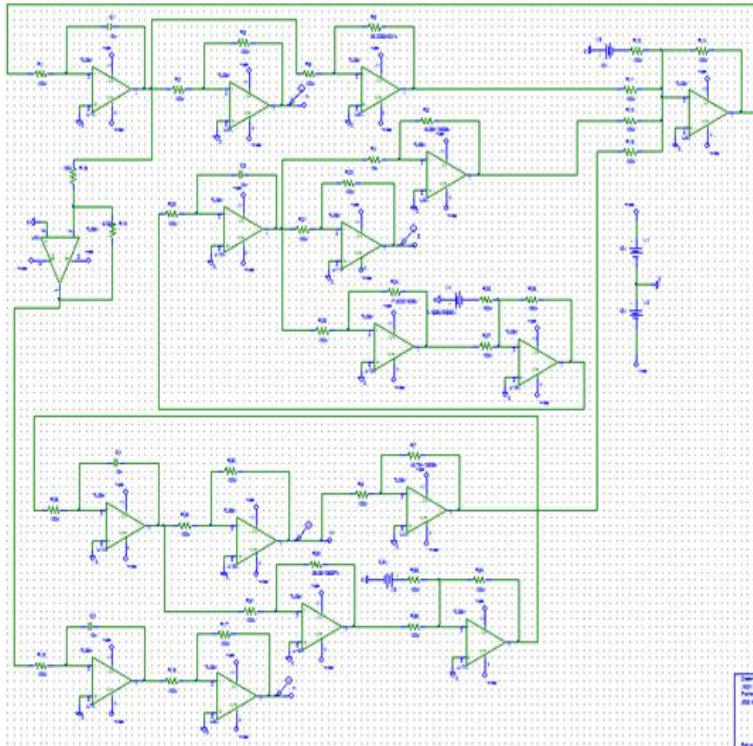


FIGURE 3.5 – circuit électronique du système dynamique du générateur synchrone (modèle d'ordre-4).

Dans ce circuit, une connexion virtuelle de la polarisation des amplificateurs opérationnels a été réalisée afin de simplifier le schéma bloc.

3.4.3 Analyse du système électronique

Le circuit représenté par la figure 3.5 est établi à base des relations suivantes :

- **Relations entre les différents condensateurs des circuits intégrateurs**

Dans ce circuit, on a : $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 10nF$

- **Relations entre les différentes résistances des circuits intégrateurs**

$R_1 = R_{15} = R_{20} = R_{28} = 100K\Omega$

- **Relations entre résistances et condensateurs des circuits intégrateurs**

L'ensemble des résistances et des condensateurs des différents circuits intégrateurs du circuit électronique ci-dessus sont liés par la relation suivante :

$$\frac{k}{R_1 C_1} = \frac{k}{R_{15} C_2} = \frac{k}{R_{20} C_3} = \frac{k}{R_{28} C_4} = 1 \quad (3.7)$$

Avec : K le facteur d'addimensionnement du temps du passage du modèle mathématique au modèle électronique et qui permet de réduire les valeurs des résistances de l'ordre du kilohm ($k\Omega$) pour permettre de visualiser les sorties du circuit à l'oscilloscope. Sa valeur est de :
 $K = 10^{-3}$.

- **Relations entre les résistances des circuits sommateurs et inverseurs**

Les différentes résistances des circuits sommateurs et inverseurs du circuit électronique ci-dessus sont :

$$R_2 = R_3 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_{15} = R_{16} = R_{17} = R_{21} = R_{22} = 100K\Omega$$

$$R_{25} = R_{26} = R_{27} = R_{29} = R_{30} = R_{33} = R_{34} = R_{35} = 100K\Omega$$

- **Relations des résistances représentant les constantes du système**

L'équivalent des différentes constantes multipliant les variables de notre système sont :

$$C = \frac{R_7}{R_6} \Rightarrow R_7 = CR_6; \text{ en fixant } R_6 = 100K\Omega \text{ on a : } R_7 = 100C = 26.34K\Omega$$

$$d = \frac{R_9}{R_8} \Rightarrow R_9 = dR_8; \text{ en fixant } R_8 = 100K\Omega \text{ on a : } R_9 = 100d = 7.14K\Omega$$

$$\Omega_0 = \frac{R_{19}}{R_{18}} \Rightarrow R_{19} = \Omega_0 R_{18}; \text{ en fixant } R_{18} = 100K\Omega \text{ on a : } R_{19} = 100\Omega_0 = 6.25K\Omega$$

$$e = \frac{R_{24}}{R_{23}} \Rightarrow R_{24} = eR_{23}; \text{ en fixant } R_{23} = 100K\Omega \text{ on a : } R_{24} = 100e = 17.32K\Omega$$

$$g = \frac{R_{32}}{R_{31}} \Rightarrow R_{32} = gR_{31}; \text{ en fixant } R_{31} = 100K\Omega \text{ on a : } R_{32} = 100g = 56.56K\Omega$$

- **Valeurs des sources de tension :**

Les constantes ne multipliant aucune variable du système sont considérées comme des sources de tension continue. On a :

$$V_3 = A = 0.56V; V_4 = f = 0.63V; V_5 = h = 0.29V;$$

$$\begin{cases} V_1 = -15V \\ V_2 = +15V \end{cases}$$

Où V1 et V2 sont les tensions de polarisation de l'amplificateur opérationnel.

Après avoir réalisé le montage ci-dessus dans le logiciel ORCAD Pspice, on place une sonde de tension à la sortie de chaque grandeur caractéristique du modèle. Ceci nous permet d'obtenir avec un pas d'intégration $h = 60ns$ et pour une durée de $20ms$ l'évolution temporelle des grandeurs caractéristiques dont les courbes sont les suivantes :

(avec pour condition initiale $\omega_0 = 0; \delta_0 = 0.0125; E'_{q0} = 1.073 \text{ et } E'_{d0} = -0.522$)

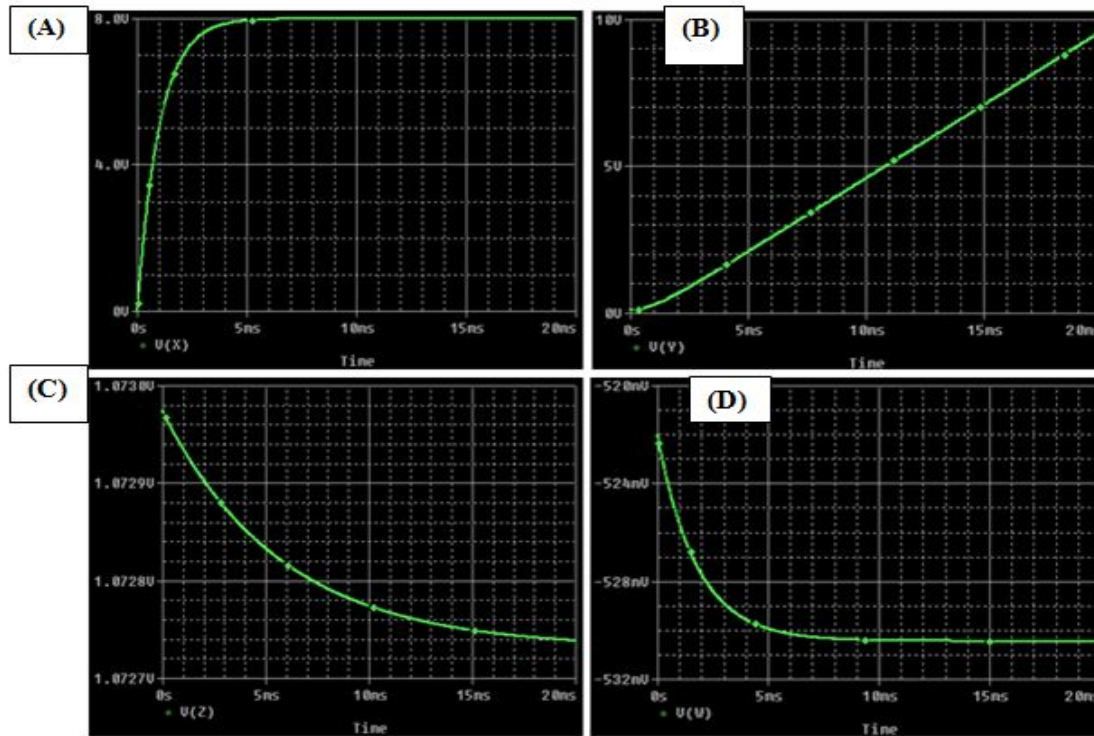


FIGURE 3.6 – évolution temporelle dans ORCAD PSPICE de ω en A ; δ en B ; E'_q en C et E'_d en D

Comparaison des résultats

Ici nous comparons les résultats obtenues par analyse numérique et ORCAD PSPICE en les plaçant côte à côte.

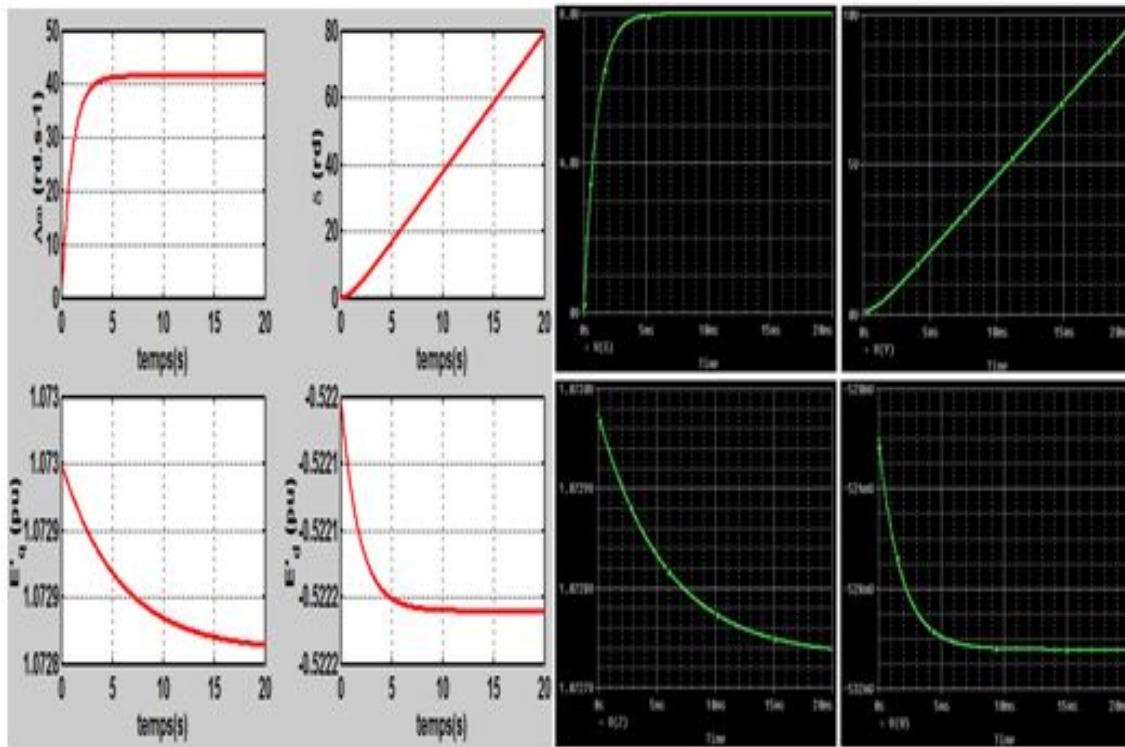


FIGURE 3.7 – comparaison des courbes obtenues par analyse numérique en rouge et celles obtenues par ORCAD PSPICE en vert.

La figure 3.6 nous montre que les courbes obtenues par le circuit électronique câblé dans Orcad Pspice décrivent parfaitement le comportement des variables d'évolution du système (3.5) obtenu dans la figure 3.1.

Conclusion

Nous avons tout au long de ce chapitre étudié la dynamique du générateur synchrone (cas du modèle d'ordre-4). Pour cette étude, nous avons dans un premier temps modélisé la dynamique du modèle d'ordre-4 à partir des variables ω , δ , E'_q et E'_d du système. L'étude de la stabilité du système obtenu nous a permis de déduire que le système possède une infinité de points d'équilibres. Nous avons complété notre étude par une analyse numérique avec le logiciel Matlab qui nous a permis d'observer l'évolution des différentes variables du système dans le temps. L'analyse numérique complémentaire faite avec l'application Simulink de Matlab a permis de confirmer les résultats obtenus. Nous avons par ailleurs réalisé le circuit électronique équivalent au système conçu avec le logiciel ORCAD PSPICE dont les courbes étaient en parfait accord avec celles obtenues par analyse numérique.

IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF DU SUJET

Introduction

La formation de l'élite enseignante au Cameroun est achevée par une soutenance de mémoire portant sur un sujet d'étude quelconque, propre à chaque filière de formation. Le sujet traité doit en outre refléter les aspects pédagogique et didactique en relations avec le cursus de formation. Dans ce chapitre nous allons présenter une fiche pédagogique qui fait le lien entre la recherche menée et le métier d'enseignant du secondaire pour lequel nous avons reçu une formation. Par la suite nous allons montrer l'intérêt didactique du sujet.

Fiche pédagogique

Nous avons conçu une fiche pédagogique comprenant un ensemble de questions portant sur l'énergie électrique et sur l'étude de quelques dipôles électriques. Cette fiche permettra à un élève des classes de 4^{eme}, 3^{eme} et de première scientifique de consolider leur connaissance sur la notion de production du courant alternatif.

Objectif général : connaître le rôle joué par un alternateur (générateur) dans une centrale hydroélectrique dans le processus de production du courant alternatif.

TABLE 3.1 – fiche pédagogique

CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE	EXEMPLE D'ACTIVITES ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE
<p>1. Définition des concepts : générateur, circuit électrique</p>	<p>Question n°1 : qu'est ce qu'un circuit électrique ? Réponse : le circuit électrique est une chaîne continue de conducteurs dans laquelle peut circuler un courant électrique.</p> <p>Question n°2 : citer quelques dipôles rencontrés dans un circuit électrique Réponse : les résistances, les inductances, les condensateurs, les diodes, les générateurs...</p> <p>Question n°3 : définir générateur Réponse : c'est un dipôle actif dissymétrique qui transforme une forme d'énergie quelconque en énergie électrique</p> <p>Question n°4 : ces différents dipôles jouent chacun un rôle spécifique dans un circuit électrique. Quel est le rôle du générateur dans un circuit électrique ? Réponse : c'est le générateur qui produit le courant électrique qui circule dans le circuit.</p>
<p>2. description d'un alternateur et connaissance du principe de production du courant alternatif</p>	<p>Question n°5 : qu'est ce qu'un alternateur ? Réponse : c'est un dispositif permettant la production d'une tension alternative</p> <p>Question n°6 : donner le principe de fonctionnement d'un alternateur Réponse : son principe de fonctionnement est basé sur la rotation d'une bobine placée dans l'entrefer d'un aimant où règne un champ magnétique. Lorsque la bobine tourne, il apparaît à ses bornes une tension tantôt positive tantôt négative appelé tension alternative. L'aimant qui est supposé fixe est appelé stator et la bobine qui est en rotation est le rotor.</p> <p>Question n°7 : quelles sont les parties essentielles d'un alternateur ? Réponse : le stator et le rotor.</p>

Intérêt didactique

Le thème de notre travail dégage des intérêts didactiques dans l'enseignement des sciences physiques. Notamment la notion de moteur à courant continu qui est abordée en classe de 3ème. Ceci permettra donc d'appréhender cette notion avec un peu plus d'aisance avec les apprenants.

Par ailleurs, Notre travail a illustré le principe de fonctionnement d'un alternateur qui est liée à la notion d'électricité alternative abordée dans les classes de 1ere scientifiques de l'enseignement général notamment au thème IV. Le travail développé donc ici, permettra à l'enseignant que nous sommes d'aborder plus aisément ces différentes notions.

Ce travail, qui est en fait une initiation à la recherche, nous a également permis d'acquérir des notions utiles pouvant nous aider à mieux orienter les apprenants dans leurs recherches au secondaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre du travail de ce mémoire, il était question de concevoir un circuit électronique de l'analyse du comportement dynamique du modèle 4D du générateur synchrone. Nous avons pour cela utilisé les équations qui régissent la dynamique de cette machine.

Pour y arriver, nous avons tout d'abord présenté les généralités sur les machines synchrones et quelques équations de bases régissant son fonctionnement. Nous avons ensuite présentés au chapitre 2 les techniques analytiques utiles à l'étude dynamique du générateur synchrone. Il était surtout question de présenter les techniques d'études des systèmes dynamiques, plus précisément les conditions de stabilisation du système. Nous avons à partir de ces conditions de stabilité constaté que le système dynamique décrivant notre modèle est stable. La fin de ce chapitre était consacrée au développement des méthodes d'approche numérique. Dans ce cadre nous avons utilisé deux logiciels de génération des composants en vue de représenter un système dynamique : le logiciel Matlab Simulink et ORCAD PSPICE. Après avoir ainsi ressorti les méthodes d'usages adéquates pour la représentation des systèmes, nous avons montré les conditions de passage d'un système dynamique à un système électronique. Dans le chapitre trois, nous avons appliqué les différentes méthodes développées au chapitre deux pour réaliser les analyses numériques et électronique du système décrivant notre modèle. Les résultats obtenus par étude numérique du système étaient en parfait accord avec celles observées à partir du système électronique généré. Ce qui veut dire que notre système de puissance peut être approché par un système électronique équivalent.

Nous avons terminer ce travail en mentionnant l'intérêt didactique de notre sujet sur le système éducatif.

Perspectives

Nous envisageons dans le futur effectuer des simulations en variant les valeurs de la tension d'excitation afin d'étudié l'impact de l'excitation sur les paramètres électriques du générateur synchrone.

Bibliographie

ADNANES A.K. & T.M. UNDELAND. Optimum torque performance in PMSP drives above rated speed. In Annual meeting IEEE Ind. Appl. Soc., pages 169-175, Oct. 1991.

AMARA Y. Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation. Application au véhicule hybride. PhD thesis, Université Paris XI, Ecole Normale Supérieure de Cachan - Laboratoire Electricité Signaux et Robotique, 2001.

AMARA Y., J. LUCIDARNE, M. GABSI, M. LECRIVAIN, A.H. Ben AHMED & A.D. AKEMAKOU. A new topology of hybrid synchronous machine. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 5, pages 1273-1281, Sep./Oct. 2001

BOLDEA I. MUNTEAN N. DEACONU S. NASAR S.A. & FU Z. Distributed anisotropy rotor synchronous drives (DARSYN) - Motor identification and performance. In Int. Conf. Electrical machines, pages 542-546, 1992.

CHALMERS B.J., L. MUSABA & D.F. GOSDEN. Variable-frequency synchronous motor drives for electrical vehicles. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 4, pages 896-903, Jul./Aug. 1996.

CHEDOT L., Etude paramétrique d'un alterno-démarrreur synchrone à aimants permanents internes - modèle magnétique. Rapport de DEA de Génie Electrique de Paris, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, 2001.

CHEVASSU C., Machines synchrones (cours et problèmes), 2014.

DELIGNIERES D., Cours de Dynamique et morphogenèse [Cours de maitrise, Option recherche], UY1, 2010.

DIVOUX C., Cours machine-synchrone (1), 1995.

FOTSIN H.B., Cours d'automatique [Master I], Université de Dschang, 2007.

FRIEDRICHG. & M. KANT. Choice of drives for electrical vehicles : a comparison between two permanent magnet AC machines. IEE Proc. -Elec. Power Appl., vol. 145, no. 3, pages 247-252, May 1998.

[Http ://www.wikipedia.com.gov/](http://www.wikipedia.com.gov/)(accessed : 05/03/2016).

JAHNS T.M., G.B. KLIMAN & T.W. NEUMANN. Interior permanent magnet synchronous motors for adjustable-speed drives. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 22, pages 803-813, July/Aug. 1986.

KOFANE T.C., Cours de système dynamique et chaos [Cours de Master II], UY1, 2011

Le BOURLLOT J., cours d'introduction aux systèmes dynamiques dissipatifs [Master Astronomie et Astrophysique], Observatoire de paris, 2008-2009

MACHOWSKI Jan, JANUSZ, BIALEK and James R BUMBY, Power system Dynamics Stability and Control, Second Edition John Wiley & Sons Ltd 2008

MILLER T.J.E., Brushless permanent magnet and reluctance motor drive. Oxford university press, 1989. L. Xu, X. Xu, T.A. Lipo & D.W. Novotny. Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, pages 977-985, 1991.

MIRCEA Eremia & Constantin BULAC. Handbook of Electrical power-system modeling stability and control. Mircea Eremia and Mohammad shahidehpour. Illinois Institute of technology, 2013

MOUAD OUBIDAR & SEDIK BENDAOU, projet de fin d'étude en ingénierie dans le cadre du programme en génie électromécanique, hiver 2010

NANA N., Cours de Dynamique des structures mécaniques non linéaire continues [Master II], UY1, 2010.

NEY H. Extraits de Electrosystème - 1res STI - éd Nathan Technique 1996,

NOUBISSIE S., Cours des systèmes dynamiques et chaos [Master II physique], Université de Dschang, 2012.

SOONG W.L. & MILLER T.J.E., Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives. IEE Proc. - Elec. Power Appl., vol. 141, no. 6, pages 331-340, 1994.

STROGATZ L.H., Non linear dynamique and chaos, [Livre] : Addison-Wesley, 1994

XU L. YE L. ZHEN L.& EL-ANTABLY A., A new design concept of permanent magnet machine for flux weakening operation. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 2, pages 373-378, 1995.