

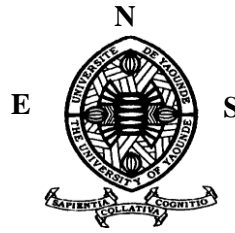
REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

MINISTRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE
DE YAOUNDE I



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

MINISTRY OF HIGH
EDUCATION

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING
COLLEGE OF YAOUNDE I

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**CONCEPTION D'UN CIRCUIT
ELECTRONIQUE POUR L'ANALYSE DU
COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN
GENERATEUR SYNCHRONES : MODELE 6-D**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Professeur
de l'Enseignement Secondaire deuxième grade (DIPES II)

Par:

SIEWE BERTRAND TITUS

Licencié en physique

Matricule: 05V148

Sous la direction de :

Prof. ATANGANA Jacques

Maître de Conférences à l'Université de Yaoundé 1

ANNEE ACADÉMIQUE: 2015-2016

CONCEPTION D'UN CIRCUIT ELECTRONIQUE POUR L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN GENERATEUR SYNCHRONES :MODELE 6-D

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de professeur
de l'enseignement secondaire général deuxième grade : **D.I.P.E.S II**

par

SIEWE Bertrand Titus

Matricule 05V148

Licencié ès Sciences

sous la direction du :

Pr ATANGANA Jacques

Maître de conférence

Université de Yaoundé 1

Année académique 2015-2016

Table des matières

Dédicace	ii
Remerciements	iii
Liste des abréviations	v
Résumé	vi
Abstract	vii
Introduction Générale	1
1 GENERALITES SUR LES MACHINE SYNCHRONES	4
1.1 Structures et Définition	4
1.1.1 Définition	4
1.1.2 Structure	5
1.1.3 Symboles	8
1.2 Les différents types de machines synchrones	9
1.2.1 Les principaux types de rotors	9
1.2.2 Classification des machines synchrones	10
1.3 Mode de fonctionnement	12
1.3.1 Fonctionnement en mode alternateur	12
1.3.2 excitations des alternateurs synchrones	13
1.3.3 Fonctionnement en mode moteur	14
1.4 Modélisation et mise en équation	14

1.5	Applications de la machine synchrone	16
1.5.1	Application en tant que moteurs synchrones	16
1.5.2	Application en tant que alternateur synchrones	16
1.5.3	Application en tant que compensateur synchrones [5]	17
1.5.4	Avantages et inconvénients de la machine synchrone [2,5]	18
2	METHODES D'ETUDE ET APPROCHE ELECTRONIQUE DES SYSTEMES DYNAMIQUES, MODELISATION D'UN GENERATEUR SYNCHRONE	20
2.1	But et principe de la modélisation des systèmes de puissance	21
2.2	Description des systèmes dynamiques	22
2.2.1	Définition d'un système dynamique	22
2.2.2	Description d'un système dynamique différentiel	23
2.2.3	Systèmes dynamiques linéaires et non linéaires	23
2.2.4	Stabilité d'un système linéaire régulier libre	25
2.2.5	Stabilité d'un système non linéaire	25
2.3	Modélisation d'un générateur synchrone	30
2.3.1	Les hypothèses simplificatrices	31
2.3.2	Transformation de Parck	32
2.3.3	Équations aux tensions	36
2.3.4	Constantes de temps et réactances du générateur dans les différents états de fonctionnement	39
2.3.5	Les équations du générateur synchrone dans les différents états de fonctionnement	43
2.3.6	Modèle d'ordre-6 du générateur synchrone	49
2.4	Conversion des systèmes dynamiques en systèmes électroniques	52
2.4.1	Symboles des opérateurs dans Matlab Simulink	52
2.4.2	Principe de câblage des équations dans Matlab Simulink	55
2.4.3	Exemple d'intégration d'une équation dans MATLAB Simulink	56
3	IMPLEMENTATION PAR DES SYSTEMES ELECTRONIQUES DU MODELE D'ORDRE 6 DU GENERATEUR SYNCHRONE POUR L'ETUDE DE SA STABILITE	58
3.1	Le modèle d'ordre-6 du moteur synchrone	59

3.1.1	description du modèle	59
3.2	Étude de la stabilité	61
3.2.1	Recherche des points fixes	62
3.2.2	Étude de la stabilité du système	63
3.3	Étude numérique de la stabilité du système dynamique	64
3.4	Approche électronique de la dynamique du système	66
3.4.1	Câblage individuel de chaque équation du système dynamique	66
3.4.2	Circuit électronique du bloc final et simulation	72
	Conclusion générale et perspectives	80
	Conclusion générale et perspectives	82
	Annexe	84
	Bibliographie	85

Table des figures

1.1	image d'un moteur synchrone [1]	5
1.2	description d'une machine synchrone [2]	6
1.3	image d'un stator d'alternateur [3]	7
1.4	image d'un rotor d'alternateur [3]	8
1.5	symboles de la machine synchrone [4]	8
1.6	image d'un rotor à pôles lisses [5]	9
1.7	image d'un rotor à poles saillants [5]	9
1.8	image d'un rotor à aimants [5]	10
1.9	Classement des machines synchrones selon Chalmer et all [6]	11
1.10	principe de fonctionnement d'une machine synchrone en mode générateur [7]	13
1.11	fonctionnement d'une machine synchrone en mode moteur [7]	14
1.12	schéma équivalent d'une phase d'une machine synchrone [8]	15
1.13	Diagramme de Behn-Eschenbourg [8]	15
1.14	schéma du principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique [9]	17
2.1	tableau de Routh	29
2.2	les enroulements dans une machine synchrone et leurs axes [13]	31
2.3	les 3 ensembles d'enroulements perpendiculaires décrivant le générateur synchrone [13]	36
2.4	application des lois de Kirchhoff aux deux types de circuits. En (a) : générateur ; en (b) : moteur[13]	37

2.5	Circuits couplés suivant les axes d et q dans l'état transitoire. (a) : pour la détermination de l'inductance de transition. (b) : pour la détermination de la constante de temps transitoire [13]	40
2.6	Circuits couplés suivant les axes d et q dans l'état subtransitoire. (a) : pour la détermination de l'inductance de l'état subtransitoire. (b) pour la détermination de la constante de temps [13]	42
2.7	Circuit équivalent du générateur avec résistances négligeables. (a) : axe-d, en (b) : axe-q [13]	50
2.8	Symbole d'une constante dans Simulink.	52
2.9	Symbole du Gain dans Simulink	53
2.10	Symbole du Produit dans Simulink	54
2.11	Symbole du Sommateur dans Simulink	54
2.12	Symbole de l'intégrateur dans Simulink	55
2.13	Schéma électronique de l'équation (2.89) dans MAtlab Simulink	57
3.1	Évolution temporelle des différentes variables de notre système dynamique. En (a) : l'écart de vitesse angulaire du rotor ; en (b) : la position angulaire du rotor ; en (c) : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (d) : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe direct ; en (e) : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (f) : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe direct.	65
3.2	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la première équation du système dynamique.	67
3.3	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la deuxième équation du système dynamique.	68
3.4	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la troisième équation du système dynamique.	69
3.5	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la quatrième équation du système dynamique.	70
3.6	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la cinquième équation du système dynamique.	71

3.7	schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la sixième équation du système dynamique.	72
3.8	schéma bloc matlab simulink du modèle d'ordre-6 du générateur synchrone	73
3.9	Évolution temporelle des différentes variables de notre système dynamique dans matlab simulink. En (a') : différence de vitesse angulaire ; en (b') : la position angulaire du rotor ; en (c') : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (d') : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe direct ; en (e') : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (f') : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe direct.	74
3.10	Comparaison des courbes obtenues par analyse numérique dans matlab en bleu et celles obtenues dans matlab simulink en jaune.	75

Dédicace

à :

Mon père, **DJOUMATCHOUA Ambroise**, tu as été mon premier maître, tu m'as appris à tenir la craie et à former mes premières lettres de l'alphabet ; ta rigueur et tes exigences ont forgé l'homme que je suis aujourd'hui,

Ma mère, **NDOMJI Jeanne Marthe**, pour ton amour sans limite, pour les nombreux sacrifices que tu n'as jamais cessés de faire pour moi ;

Mon oncle, **SIEWE Alain**, mon mentor, mon modèle. ton parcours scolaire a été pour moi une véritable source d'inspiration, sans ton soutien moral et financier je ne serai jamais arrivé jusqu'ici ;

Mon grand-père, sa majesté, **SIEWE GABRIEL, ROI DES BAKOTCHEU**, pour tes nombreux conseils et ton amour.

Remerciements

- Tout d’abord nous remercions **DIEU**, le Père Tout Puissant, pour nous avoir donné le courage, la force et la santé de bien mener ce travail ;et d’avoir permis que nous ayons un environnement de travail moral et intellectuel assez soutenu avec des personnes dévouées à notre réussite. ainsi nous remercions :
- Le Professeur **ATANGANA Jacques**, qui malgré ses nombreuses occupations, a bien voulu encadrer ce travail ; professeur entre vos remarques brèves et pertinentes et vos exigences visant le meilleur, j’ai découvert toute la passion qui existe dans la recherche et notamment en électronique ; je vous en suis énormément reconnaissant
- Aux membres du jury qui ont accepté d’examiner ce travail ;
- Au Professeur **BEGUIDE BONOMA**, Chef de département de physique à l’ENS de yaoundé, ainsi qu’à **tous les enseignants du département de physique à l’ENS de Yaoundé** ;
- Mon grand frère **TCHOUEGOUE Aimé**, qui a toujours cru en moi et m’a soutenu même dans les moments les plus difficiles ;
- Mon oncle de regrété mémoire **DEUGOUE polycape**, pour tes conseils et ton soutien, puisse la terre de nos encêtres t’être légère ;
- mes petits frères et soeurs notamment : **NGAMALEU Modeste,DJIENA**

Boris Brandon, MOUMENI Raissa, SIEWE Williams, TOUMENI Yvonne, NOUBISSI Juliette, SIEWE Ulrich, DJIENA Cathy, SIEWE Constant, DJIENA Dibrila, NGANDJO Novis..., parfois, dans le souci d'être un exemple pour vous, j'éprouve l'envie de me surpasser et de toujours réussir ;

– Tous mes oncles et tantes **SIEWE Roger , MBODA Marcel, NGALANI Jacques, DJIEGOUE Cathérine, SIEWE Nadège, NGANDJUI SIEWE Bertrand...** ; pour leurs conseils et soutiens ;

– **KETCHA Link** , pour ta présence et ton soutien

– tous mes camarades de promotion, particulièrement **HEUTEU Crepin, YOUTCHOM Jean Lapluie, DIMO Sonia, DJOUFACK Ines, KOLOKO Sorel....**, pour votre soutien sans condition durant ces deux années de formation. je n'oublie pas nos délégués de promotion **BADUIDANA Martial et DOGNE Franck**, mes camarades avec qui j'ai eu le même encadreur **TAF-FOU Arnold, TATSA Jiresse, SIEWE Carmen, DEZOUMBE** Merci pour la bonne ambiance et l'esprit de solidarité dont vous avez fait preuve

– **un aîné académique, KIAFOU Christian** pour son aide et sa disponibilité dans la réalisation de ce travail ;

– Tous les membres de l'Association des Jeunes Solidaires de Yaoundé ; **AJSY**, pour tout l'amour, la fraternité, la solidarité que j'ai retrouvés auprès de vous

– tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire et dont les noms ne figurent pas ici, qu'ils daignent accepter l'expression de ma profonde gratitude.

Liste des abréviations

f.e.m : force électromotrice

MAPI : Machine à Aimant Permanent Interne

IPMM : Interior Permanent Magnet Machine

Résumé

Dans ce travail, nous développons sous la base d'un certain nombre d'hypothèses un modèle dynamique décrivant le comportement d'un générateur synchrone. Par la suite, nous ressortons les outils mathématiques nécessaires pour l'étude et la résolution du système dynamique obtenu. Le circuit électronique correspondant est réalisé à l'aide du logiciel Matlab Simulink. cette approche peut par la suite aider à l'étude de la stabilité du générateur synchrone lorsqu'il est soumis à certaines perturbation.

Mots clés : Modèle dynamique, Générateur synchrone, Circuit électronique, stabilité .

Abstract

In this work, we develop a dynamic model from certain assumptions , which describes the behavior of a synchronous generator. Afterwards, we give off the usefull mathematical tools for the analysis and the resolution of that dynamic system. Then, we product the equivalent electronic circuit from the software Matlab Simulink. This approach can help to study the stability of the synchronous generator under some perturbations.

Keywords : dynamic model, synchronous generator, electronic circuit, stability.

Introduction Générale

La complexité des réseaux d'interconnexions et leur soumission à plusieurs contraintes économiques, écologiques et techniques ont amené les fournisseurs d'énergie électrique à faire fonctionner les réseaux à pleine capacité pour avoir un équilibre entre l'augmentation de la consommation et la production, et ce dans des conditions de plus en plus proche des limites de stabilité. Dans ces conditions sévères et limites d'opération, l'occurrence de n'importe quelle contingences ou perturbations telles que les court-circuits, les variations brusques des charges, les pertes dans lignes et les pertes d'ouvrage (lignes, générateurs, transformateurs, etc.) peuvent mener à une situation critique commençant par des oscillations électromécaniques souvent mal amorties suivies de la perte de synchronisme et d'instabilité de système [1,2]. Ces oscillations électromécaniques de faibles fréquences sont liées à l'angle de rotor des machines synchrones fonctionnant dans un système les reliant ensemble par des lignes de transmission longues avec d'autres groupes des machines. Celles-ci limitent la capacité de transfert des systèmes de puissance et continuent à se développer entraînant la perte de synchronisme et la séparation du système si aucune réponse adéquate n'est rapidement prise. Pour surmonter le problème des oscillations électromécaniques et améliorer l'amortissement du système, des signaux supplémentaires stabilisateurs sont ajoutés dans le système d'excitation via le régulateur de tension [1].

Mais pour parvenir à la mise en place de ces systèmes de stabilisation, il est important de s'intéresser au comportement dynamique du générateur synchrone, qui constitue à lui seul l'un des composants les plus coûteux et les plus incontournables dans un réseau électrique. Ainsi, la connaissance de son comportement dynamique par la modélisation permettrait de prédire ses réactions en fonction des perturbations dont elle serait sujette. Dans la littérature La modélisation de la machine synchrone est faite sous deux angles [2] :

- L'un numérique et axé sur la méthode des éléments finis permettant de déterminer le champ magnétique propre à chaque élément.
- L'autre analytique et basé sur l'analyse des différents phénomènes physiques de la machine pour en déduire les équations électromécaniques.

Bien que la modélisation par les éléments finis reste plus précise, son temps de calcul est extrêmement long. La majorité des travaux sur la modélisation de la machine synchrone est réalisée à partir de la théorie de Park, et pour les machines synchrones, cette théorie s'applique en admettant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices [2] sur la base desquelles la machine peut être approximativement modélisée par des circuits électriques à paramètres localisés constitué d'éléments linéaires tels que les inductances et les résistances.

Une fois les équations dynamiques décrivant le système obtenu, il est possible de concevoir des circuits électroniques à l'aide des logiciels tels matlab Simulink, Pspice, ISIS Proteus etc, permettant de simuler le comportement du générateur afin d'en étudier les réactions en fonction des perturbations et ainsi étudier sa stabilité.

Notre travail sera donc articulé autour de quatre 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, puis sous la base des hypothèses simplificatrices, nous développerons un nouveau modèle du générateur synchrone. Et enfin nous présenterons l'arsenal électronique nécessaire pour l'implémentation du circuit équivalent du modèle obtenu.

- 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 au logiciel Matlab Simulink, d'implémenter un circuit électronique représentant notre générateur. Sa fiabilité sera étudiée par comparaison des courbes d'évolution de ses paramètres qu'il produira à celles du système dynamique obtenues dans Matlab.

- Au quatrième chapitre sera développé 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.

Introduction

Les machines synchrones font partie des principaux composants des réseaux électriques. Leur étude permet de réunir un certains nombres d'informations sur le fonctionnement du réseau. Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur ces machines, notamment leur constitution, les différents types de machine synchrone, leurs différents modes de fonctionnement. Nous terminerons par leurs applications, leurs avantages et inconvénients.

1.1 Structures et Définition

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 appelée 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. La figure suivante présente une image d'un moteur synchrone :



FIGURE 1.1 – image d'un moteur synchrone [1]

1.1.2 Structure

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor constituant l'inducteur, et d'une partie fixe, le stator constituant l'induit et portant des enroulements. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant). la mince zone entre ces deux éléments est appelée entrefer. la figure suivante illustre sommairement cette constitution :

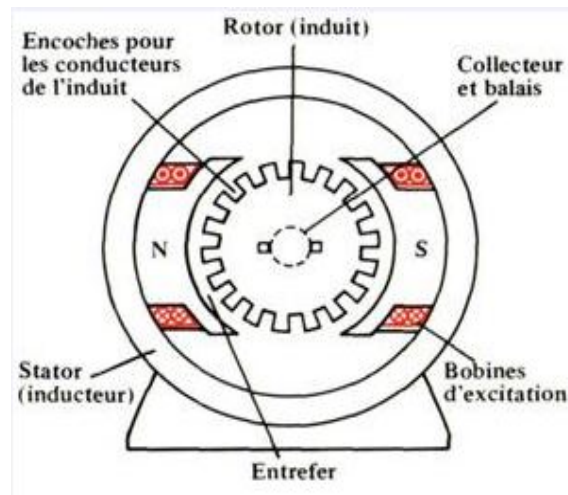


FIGURE 1.2 – description d'une machine synchrone [2]

- Stator ou l'induit : Le stator est formé d'un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour réduire les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator. Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de 120° . Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'enroulement est ouvert. C'est à l'utilisateur de réaliser le couplage. Parce que l'induit est fixe, on peut isoler fortement ses conducteurs.

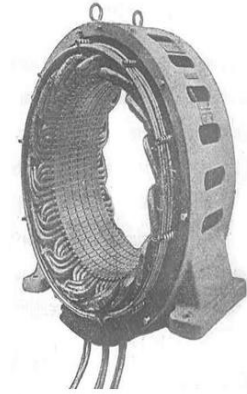


FIGURE 1.3 – image d'un stator d'alternateur [3]

- Rotor ou inducteur : il tourne à l'intérieur du stator immobile et porte, dans les encoches disposées à sa périphérie, un enroulement parcouru par un courant continu. Le courant continu provient du système d'excitation. Le rotor excité, en tournant, produit un champ tournant avec lui. Ce champ tournant engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator. Les pôles sont alternativement nord et sud ; leur nombre total $2 p$ est toujours paire. Certains rotors n'ont que 4 pôles, il en est qui en possèdent plusieurs dizaines. Si les différentes phases du stator sont fermées sur un circuit extérieur, elles sont parcourues par des courants alternatifs. L'ensemble de ces courants produit un champ tournant dans le même sens et à la même vitesse que le rotor. Le champ du rotor est proportionnel au courant d'excitation ; le champ du stator est proportionnel au courant I dans les phases de l'enroulement du stator.

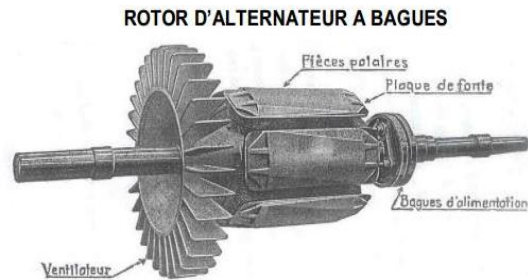


FIGURE 1.4 – image d’un rotor d’alternateur [3]

1.1.3 Symboles

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

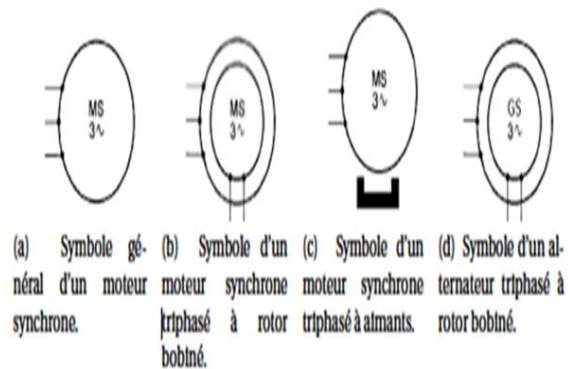


FIGURE 1.5 – symboles de la machine synchrone [4]

1.2 Les différents types de machines synchrones

1.2.1 Les principaux types de rotors

De façon générale, on distingue 3 grandes familles de rotor ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique : Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants.

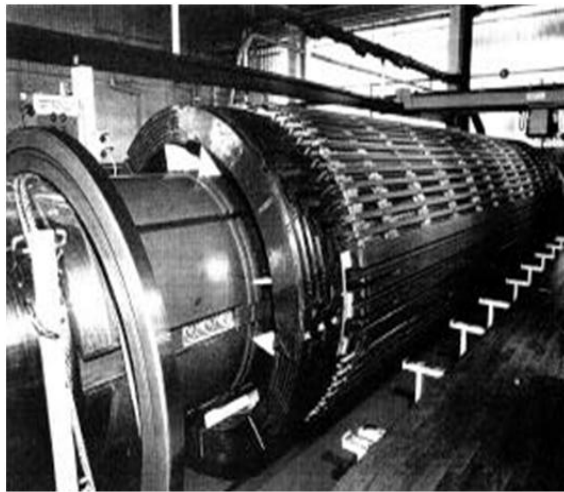


FIGURE 1.6 – image d'un rotor à pôles lisses [5]

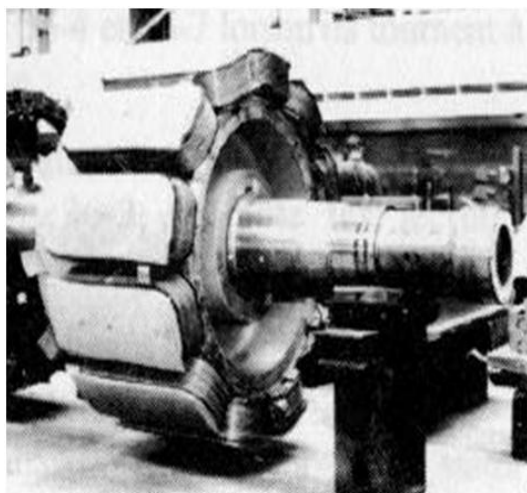


FIGURE 1.7 – image d'un rotor à poles saillants [5]

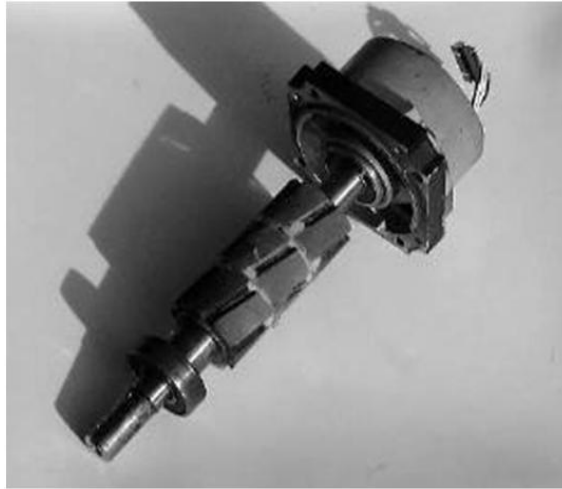


FIGURE 1.8 – image d'un rotor à aimants [5]

1.2.2 Classification des machines synchrones

à partir du principe de la classification de Chalmers et al [6] , on peut présenter l'ensemble des machines synchrones comme l'indique la figure (1.9) suivante : Les machines étant 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 et L_q sont les inductances des enroulements respectivement sur l'axe q et sur l'axe d :

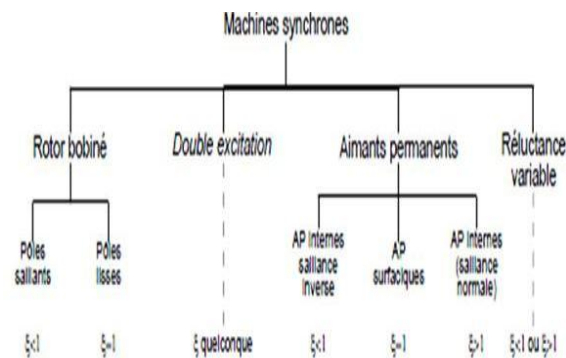


FIGURE 1.9 – Classement des machines synchrones selon Chalmer et all [6]

On peut alors citer entre autre [5] :

- Machines à rotor bobiné et à pôles lisses .

Elles sont caractérisées par une excitation bobinée et par un rapport de saillance unité. On peut inclure dans cette partie les machines synchrones à griffes, très fréquemment utilisées dans l'automobile pour réaliser les alternateurs classiques.

- Machines à rotor bobiné et à pôles saillants

A la différence de la machine précédente, les pôles sont saillants, et le rapport de saillance est inférieur à l'unité ($L_d > L_q$)

- 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.

- Machines à aimants permanents internes(MAPI)

Ici on inclue les machines à aimants permanents internes à saillance normale, c'est-à-dire supérieure à 1. C'est le type de machine que l'on trouve classiquement

dans la littérature. Les MAPI comprennent elles-mêmes des structures très diverses.

On peut citer :

- 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, souvent appelées machines à concentration de flux.

- les machines à aimantation radiale : ce sont les seules appelées Interior Permanent Magnet machine (IPMM) dans la littérature. Ce sont les plus anciennes et les plus classiques et très utilisées pour les applications liées à la traction électrique.

1.3 Mode de fonctionnement

Les machines synchrones sont réversibles car elles possèdent deux modes de fonctionnement à savoir : mode générateur ou alternateur et mode moteur.

1.3.1 Fonctionnement en mode 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 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. La figure suivante décrit de façon simple le principe de fonctionnement en mode générateur.

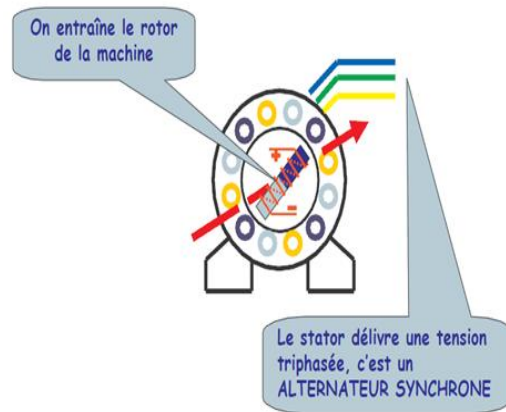


FIGURE 1.10 – principe de fonctionnement d’une machine synchrone en mode générateur [7]

En général un moteur auxiliaire de démarrage est nécessaire pour le fonctionnement d’un alternateur. Il faut une excitation, c’est-à-dire une deuxième source d’énergie.

1.3.2 excitations des alternateurs synchrones

Le système d’excitation de l’alternateur est la source du courant continu créant le champ dans l’alternateur. Il en existe deux types :

- L’excitation dynamique :

Dans la plupart des systèmes à excitation dynamique la source de courant continu est une génératrice à courant continu fixée en bout d’arbre de l’alternateur.

- L’excitation statique :

Rencontrée en général dans les alternateurs sans bagues ni balais. le système d’excitation ici est un pont de diodes tournant dont les pôles positifs et négatifs sont reliés aux extrémités de bobinage de l’alternateur.

1.3.3 Fonctionnement en mode 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. La figure suivante décrit également de façon simple le principe de fonctionnement en mode moteur :

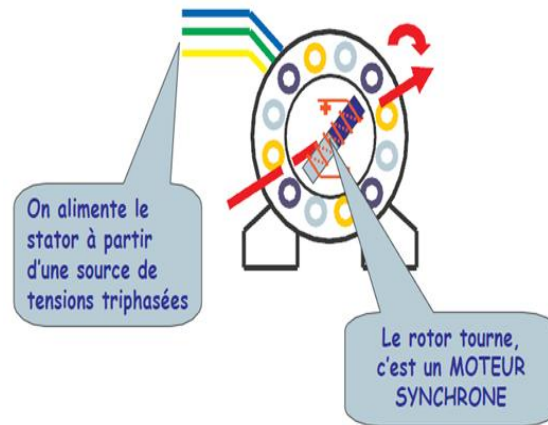


FIGURE 1.11 – fonctionnement d’une machine synchrone en mode moteur [7]

1.4 Modélisation et mise en équation

Partant de l’hypothèse que toutes les pertes ainsi que les phénomènes de saturation sont négligés, l’étude du fonctionnement d’une machine synchrone en régime sinusoïdal se fait sur la base du schéma équivalent d’une phase, donné par la figure suivante :

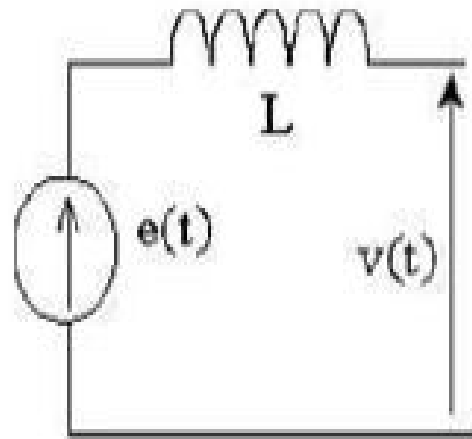


FIGURE 1.12 – schéma équivalent d'une phase d'une machine synchrone [8]

L'équation de la tension de sortie est : $V = E + jL\omega i$

Diagramme des phaseurs est alors le suivant :

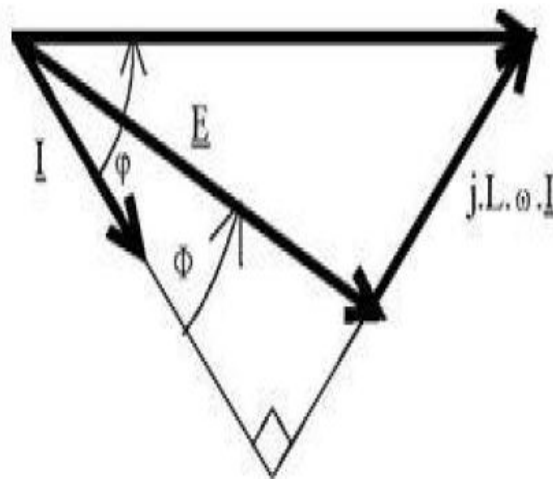


FIGURE 1.13 – Diagramme de Behn-Eschenbourg [8]

Avec : L : Inductance

$e(t)$: 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

1.5 Applications de la machine synchrone

La machine synchrone offre de nombreuses applications en tant que moteur ou alternateur.

1.5.1 Application en tant que moteurs synchrones

- Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW) dans les compresseurs de pompe, On les retrouve également dans les trains à grande vitesse (Les tgv).

- 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 et on les retrouve dans des appareils domestiques tels que : les lecteur-CD, appareil enregistreur, les ventilateurs, les robots mixeurs ... etc

1.5.2 Application en tant que alternateur synchrones

Ils fournissent une grande partie de l'énergie du réseau éneo-Cameroun. On les trouve dans les barrages tels que : barrage hydroélectrique de Lom pangar, de mekin, de memvele 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 :

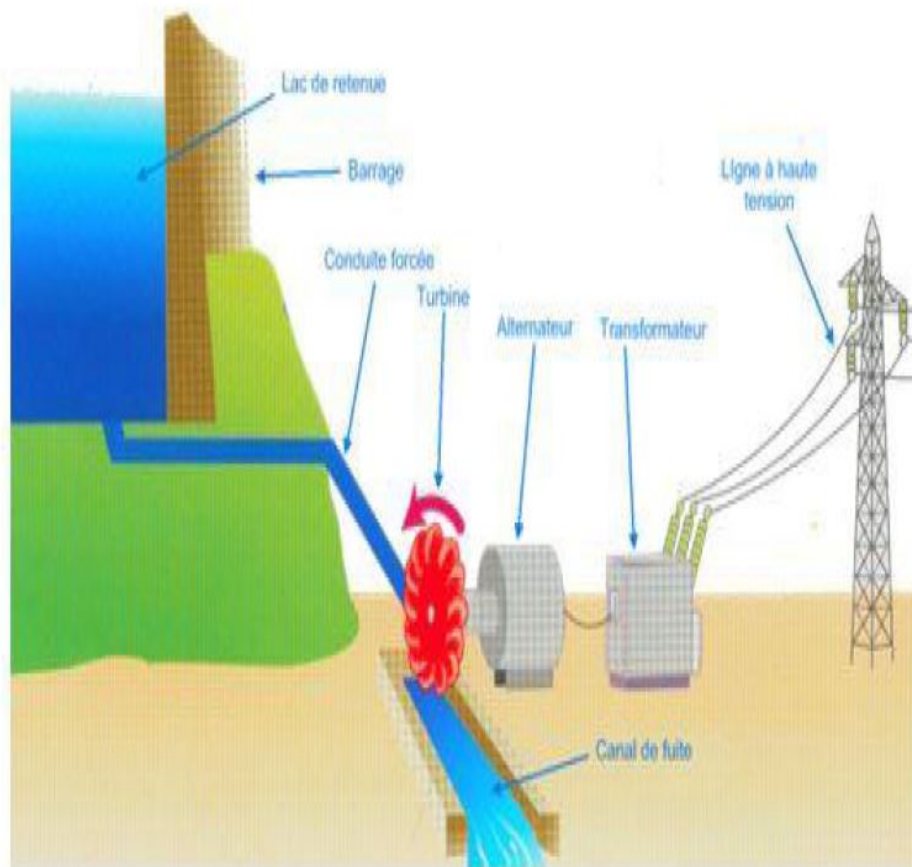


FIGURE 1.14 – schéma du principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique [9]

1.5.3 Application en tant que compensateur synchrones [5]

On appelle compensateur synchrone une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau. C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie réactive (la machine est surexcitée) ou de consommer de l'énergie (si la machine est sousexcitée). De telles machines sont utilisées notamment pour fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et pour absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible.

1.5.4 Avantages et inconvénients de la machine synchrone [2,5]

La machine synchrone présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

- Les avantages

- * Elle est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu.

- * On peut régler son facteur de puissance $\cos\varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e

- * Meilleures caractéristiques thermiques, la localisation des pertes fer au stator simplifie son refroidissement.

- * Elle a une puissance massique et volumique importante

- * Son rendement et son facteur de puissance sont élevés

- * Elle a une capacité à fonctionner à très haute vitesse.

- Les 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

- * Prix couteux dans le cas d'utilisation des aimants permanents en terre rare

- * Risque de désaimantation

conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire le moteur synchrone tout en citant les différents types. Nous avons également présenté toute son importance dans le

domaine énergétique notamment lorsqu'il est utilisé comme alternateur dans les réseaux électriques. Pour approfondir son étude, on peut faire appel à la modélisation et aux systèmes dynamique, afin d'étudier sa stabilité lorsqu'il est soumis à des perturbations.

Introduction

Lorsque nous voulons prédire ou apporter une description cohérente à un phénomène physique concret, nous pouvons généralement passer par un modèle analytique où les différentes grandeurs sont exprimées par des indéterminées (valeurs abstraites) et les lois de la physique par des fonctions, dans la mesure où elles sont connues (le cas échéant, nous pouvons faire une hypothèse et la tester). En traduisant un phénomène physique par des équations, nous transformons la réalité en une expérience mathématique, virtuelle, selon certaines règles : on parle alors de modélisation. Les systèmes dynamiques d'équations différentielles représentent une bonne approche pour la description de certains phénomènes, ils assurent remarquablement la relation entre les mathématiques et les domaines de la science tels que la mécanique, la biologie, l'électronique...etc. Dans ce chapitre nous présenterons les notions de systèmes dynamiques, de linéarité et de non linéarité, de stabilité d'un système dynamique. Et, à partir d'un certain nombre d'hypothèses, nous établirons un ensemble d'équations modélisant une machine synchrone. Ensuite, nous présenterons quelques outils et méthodes électronique pour approcher les systèmes dynamiques.

2.1 But et principe de la modélisation des systèmes de puissance

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 :

- des variables correspondant aux différents états du système étudié.
- des paramètres qui sont des constantes spécifiques liées au système
- Enfin des contraintes qui représentent un domaine dans lequel les résultats sont supposés être trouvés.

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

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 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 [6 ; 7].

2.2.2 Description d'un 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'électronique, l'économie... [6]

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

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

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 correspondent en général au 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 revient 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 [8].

2.2.3 Systèmes dynamiques linéaires et non linéaires

2.2.3.1 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 réguliers car ils sont régis par des équations matricielles, en général de la forme :

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

ou :

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

Avec $x^T = (x_1 \dots x_n)$; $f^T(t) = (f_1(t) \dots f_2(t))$, a, b, c : matrice (n, n) constantes.

2.2.3.2 Systèmes dynamiques non linéaires

La non-linéarité renvoie d'une manière générale à une rupture de la proportionnalité des causes et des conséquences [7] 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 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 [9]. Il revient souvent à faire une analyse qualitative des trajectoires dans l'espace de phases. Pour cela on détermine les points 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

degré 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 décrit par l'équation :

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

Où A est matrice à coefficients constants. Nous supposons ici que la matrice A est régulière et que O est le seul point d'équilibre [10].

i) A possède deux valeurs propres λ_1 et λ_2 réelles : alors O sera un noeud stable (attractif) si $\lambda_2 < \lambda_1 < 0$; 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 puits (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.

2.2.5.1 Recherche des points fixes

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n, c_1) \\ \frac{dx_2}{dt} = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n, c_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{dx_n}{dt} = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n, c_n) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

On appelle points d'équilibre ou encore points fixes : l'ensemble des points $(x_1 \dots x_n)$ 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 $\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \dots = \frac{dx_n}{dt}$

2.2.5.2 Etude de la 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{x}_n = 0 \end{array} \right. \quad (2.7)$$

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

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_e + \vec{u} \quad (2.8)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u}_1 = F_1(\vec{X}_e) + \frac{\partial F_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} u_2 + \dots u_n + \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_{ne}} \\ \dot{u}_2 = F_2(\vec{X}_e) + \frac{\partial F_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} u_2 + \dots u_n + \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_{ne}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{u}_n = F_n(\vec{X}_e) + \frac{\partial F_n}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} u_1 + \frac{\partial F_n}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} u_2 + \dots u_n + \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_{ne}} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

(2.9) s'écrit alors :

$$\vec{\dot{u}} = \vec{F}(\vec{X}_e) + A \vec{u} \quad (2.10)$$

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

$$\vec{u} = A\vec{u} \tag{2.11}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

\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 [11]. Les théorèmes mathématiques associés sont les suivantes :

Théorème 2.1

a) X_e est un point d'équilibre stable si toutes les valeurs propres de la matrice A sont à partie réelle strictement négative.

b) 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 2.2. (Routh-Hurwitz) [12]

Supposons l'équation caractéristique de la matrice A donnée par :

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + a_2 p^2 + a_1 p^1 + a_0 = 0 \quad (2.13)$$

Où les a_i sont les solutions de l'équation (2.13) représentant 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 $i \in [1, n] \cap N$, et, d'autre part, sur le signe d'un certain nombre de déterminants. Pour qu'un point d'équilibre décrivant l'équation (2.7) soit stable, il faut que les deux critères suivants soient vérifiés :

- Tous les $a_i, i \in [1, n] \cap N$ doivent être de même signe et non nuls.
- Tous les $a_i, i \in [1, n] \cap N$ 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 de Routh de la figure 2.1 soient de même signe.

p^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	...	a_2	a_0	}	...	a_3	a_1
p^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	...	a_1				...	a_2
p^{n-2}	b_{n-2}	b_{n-4}	b_{n-6}	...	si n pair		}	...	si n impair	
p^{n-3}	c_{n-3}							
...								
p^1								
p^0	...									

FIGURE 2.1 – tableau de Routh

La première ligne contient les coefficients des termes en p^{n-2k} dans l'ordre des puissances décroissantes. La deuxième ligne contient les coefficients des termes en p^{n-1-2k} , et se termine suivant la parité de n. Les lignes suivantes sont remplies en suivant les lois de formation suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{n-2} = \frac{-1}{a_{n-1}} \left| \begin{array}{cc} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{array} \right| ; b_{n-i} = \frac{-1}{a_{n-1}} \left| \begin{array}{cc} a_n & a_{n-i} \\ a_{n-1} & a_{n-i-1} \end{array} \right| \\ c_{n-3} = \frac{-1}{b_{n-2}} \left| \begin{array}{cc} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_{n-2} & b_{n-4} \end{array} \right| ; c_{n-j} = \frac{-1}{b_{n-2}} \left| \begin{array}{cc} a_{n-1} & a_{n-j} \\ b_{n-2} & b_{n-j-1} \end{array} \right| \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Si nécessaire, une case vide est prise égale à zéro. Le calcul des lignes est poursuivi jusqu'à ce que la première colonne soit remplie.

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons présenter de façon résumée une description des systèmes dynamiques ainsi que quelques méthodes d'étude de leurs stabilités. dans ce qui suit, nous allons essayer de retrouver un système dynamique d'équations qui régit le fonctionnement du moteur synchrone.

2.3 Modélisation d'un générateur synchrone

Lorsqu'un générateur synchrone est soumis à de brusques changements comme par exemple un court circuit sur les terminaux de la machine, les effets font passer le système à 3 états caractéristiques :

- Etat sous-transitoir
- Etat transitoire
- Etat stable

Dans le but d'étudier le comportement d'une machine synchrone suite à une perturbation, nous allons dans cette partie concevoir un modèle mathématique pour

le décrire sous toutes les conditions de fonctionnement. Ce modèle permettra de représenter le générateur par un certain nombre de circuits électriques. Et sur la base de certaines hypothèses, ces modèles seront simplifiés et donneront des modèles de générateurs pouvant être utilisés dans des situations réelles.

2.3.1 Les hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous avons adopté le schéma de la figure suivante pour le générateur synchrone :

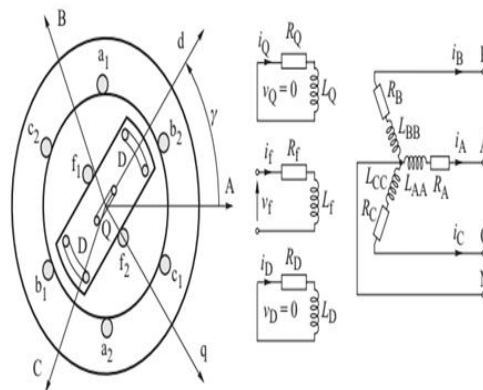


FIGURE 2.2 – les enroulements dans une machine synchrone et leurs axes [13]

Le schéma de la figure (2.2) présente le générateur avec 3 enroulement de phase du stator (A,B,C), le champ d'enroulement du rotor (F) et deux autres enroulements d'amortissement du rotor, l'un suivant l'axe d (D) et l'autre suivant l'axe q (Q). Sur cette figure ressort également les positions relatives des enroulements et leurs axes avec le centre de la phase A pris comme référence.

Pour développer le modèle mathématique on a émis les hypothèses suivantes [13] :

- Les 3 enroulements de phase du stator sont symétriques

- La capacité des enroulements peut être négligée
- Chacune des distributions d'enroulement peut être représentée par un enroulement concentré.
- Les variations de l'inductance des enroulements du stator dû à la position du rotor est sinusoïdale et ne contient pas les harmoniques supérieures.
- Les pertes par hystérésis sont négligeables mais l'influence des courants de remous peut être incluses dans le modèle des enroulements
- A l'état transitoire et sous transitoire la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisation
- Le circuit magnétique est linéaire (non saturé) et l'inductance ne dépend pas du courant.

2.3.2 Transformation de Parck

Tous les enroulements du générateur sont magnétiquement couplés et le flux dans chacun dépend du courant dans les autres enroulements. Ceci se traduit par la matrice suivante :

$$\begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{CD} & L_{CQ} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} \psi_{ABC} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{SR}^T & L_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Où :

L_S : est la sous matrice des inductances propres et mutuelles du stator

L_R : est la sous matrice des inductances propres et mutuelles du rotor

L_{SR} : est la sous matrice des inductances mutuelles du stator et du rotor.

L_i : est l'inductance propre de l'enroulement i

L_{ij} : est l'inductance de couplage entre les enroulements i et j

Avec : (i, j) = (A , B, C, D, Q, F).

Le référentiel du rotor est lié a celui du stator par l'angle γ . Ainsi, dans chaque phase, le courant, la tension ou le flux dans le système d'axe (A B C) peut être transformé dans le système (d; q) par projection. En utilisant la notation de la figure (2.2) ,on a :

$$\begin{cases} i_d = \beta_d(i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + i_C \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3})) \\ i_q = \beta_q(i_A \sin \gamma + i_B \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + i_C \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3})) \end{cases} \quad (2.17)$$

Le système (2.17) est à 2 équations et 3 inconnues d'où l'utilité d'une 3eme équation. Elle est définie sur la base d'une 3eme coordonnée d'indice 0 du fait de la symétrie des composants de façon à avoir un repère (0, d, q). Cette 3eme équation est donnée par :

$$i_0 = \beta_0(i_A + i_B + i_C) \quad (2.18)$$

En combinant les équations (2.17) et (2.18) nous pouvons écrire :

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_0 & \beta_0 \\ \beta_d \cos \gamma & \beta_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \beta_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \beta_q \sin \gamma & \beta_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \beta_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$\beta_0; \beta_d; \beta_q$ sont des coefficients arbitraires non nuls relatifs au changement de la base du stator (A,B, C) à celle du rotor (d, q).

posons :

$$W = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_0 & \beta_0 \\ \beta_d \cos \gamma & \beta_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \beta_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \beta_q \sin \gamma & \beta_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \beta_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La matrice W est matrice de passage de la base (A, B, C) à la base (0, d, q).

Dans le souci d'avoir une matrice orthogonale, nous prenons [13] :

$$\beta_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ et } \beta_d = \beta_q = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

En prenant en compte les transformations de tous les courants des enroulements, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

où I est une matrice diagonale unité. On peut définir des relations similaires avec les flux et les tensions dans le rotor. La relation inverse de (2.21) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0qd} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

L'équation (2.15) donnant le flux permet d'écrire en tenant compte de la relation (2.22) :

$$\begin{bmatrix} \psi_{0dq} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{SR}^T & L_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

En appliquant ainsi W à toutes les sous matrice de l'équation (2.23) ,on obtient :

$$\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & KM_f & KM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & KM_Q \\ 0 & KM_f & 0 & L_f & L_{fD} & 0 \\ 0 & KM_D & 0 & L_{Df} & L_D & L_{DQ} \\ 0 & 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

où :

K est une constante et $K = \sqrt{\frac{3}{2}}$

M_l : inductance mutuelle entre l'enroulement l du rotor et les enroulements du stator, l= (f, D, Q)

L_i : est l'inductance propre de l'enroulement i

L_{ij} : est l'inductance de couplage entre les enroulements i et j avec : i = (0, d , q, f, D, Q) et j = (f, D, Q).

Cette transformation des enroulements du générateur dans le référentiel du rotor est appelée transformation de Park.

En réordonnant les variables de l'équation (2.24) on obtient :

$$\psi_0 = L_0 i_0 \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_f \\ \psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & KM_f & KM_D \\ KM_f & L_f & L_{fD} \\ KM_D & L_{fD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & KM_Q \\ KM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Les 3 équations (2.25) ; (2.26) et (2.27) décrivent 3 ensembles d'enroulement indépendants les uns des autres. La figure suivante reflète bien ces 3 ensembles d'enroulement perpendiculaire entre eux :

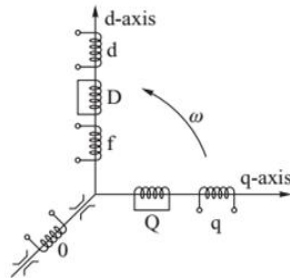


FIGURE 2.3 – les 3 ensembles d'enroulements perpendiculaires décrivant le générateur synchrone [13]

2.3.3 Équations aux tensions

La machine synchrone, comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre1, peut fonctionner en générateur ou en moteur. Et selon le cas, les lois de Kirschhoff s'appliquent différemment comme le montre la figure suivante :

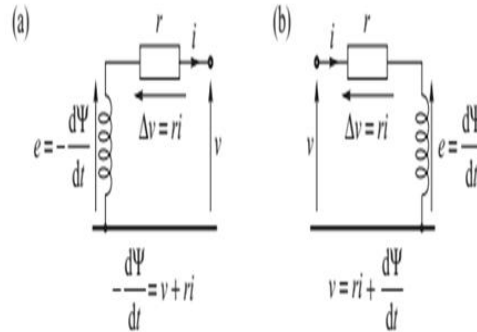


FIGURE 2.4 – application des lois de Kirchhoff aux deux types de circuits. En (a) : générateur ; en (b) : moteur[13]

Avec cette convention, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ -v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Ou encore sous forme de matrices compactes :

$$\begin{bmatrix} v_{ABC} \\ v_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{ABC} & 0 \\ 0 & R_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ABC} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

En utilisant la matrice de passage W définie précédemment, on passe de la base du stator (A,B,C) à celle du rotor (0, d, q) par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} W \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{ABC} \\ R_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^{-1} \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W \\ I \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} W^{-1} \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{0dq} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

On définit également une matrice de rotation donnée par :

$$\Omega = W^{-1} \frac{dW}{dt} \quad (2.31)$$

Et après développement on trouve :

$$\Omega = \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Où ω est la vitesse angulaire de rotation du rotor, obtenue en dérivant par rapport au temps la position rotorique γ présente dans l'expression de la matrice W . En substituant l'équation (2.32) dans l'équation (2.30) nous obtenons les équations en tension dans le repère (d,q) :

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{ABC} \\ R_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\psi}_{0dq} \\ \dot{\psi}_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{0dq} \\ \psi_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Nous pouvons décomposer l'équation (2.33) en :

$$\begin{cases} v_0 = -Ri_0 - \dot{\psi}_0 \\ v_d = -Ri_d - \dot{\psi}_d - \omega\psi_q \\ v_q = -Ri_q - \dot{\psi}_q + \omega\psi_d \end{cases} \quad (2.34)$$

et :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 = R_D i_D + \dot{\psi}_D \\ 0 = R_Q i_Q + \dot{\psi}_Q \end{cases} \quad (2.35)$$

Les f.e.m de transformation $\dot{\psi}_d$ et $\dot{\psi}_q$, sont en général négligeables devant les f.e.m rotationnelles $+\omega\psi_d$ et $-\omega\psi_q$. On approxime alors l'équation (2.20) décrivant la tension du générateur par :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \approx - \begin{bmatrix} R & \\ & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_q \\ +\psi_d \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Mais l'équation (2.22) ne change pas, et réarrangée, elle donne :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_f & & \\ & R_D & \\ & & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Les équations différentielles (2.36) et (2.37) ensemble avec les équations (2.26) et (2.27) constituent le modèle du générateur synchrone avec les f.e.m de transformation négligées.

2.3.4 Constantes de temps et réactances du générateur dans les différents états de fonctionnement

2.3.4.1 État stable

Lorsque dans cet état le flux de l'armature a pénétré à travers les circuits du rotor, le champ et le courant de l'enroulement sont constants et le courant de l'armature

accompagne simplement les inductances L_d suivant l'axe-d et L_q suivant l'axe-q

2.3.4. État transitoire

Nous présentons sur la figure suivante les circuits couplés dans l'état transitoire :

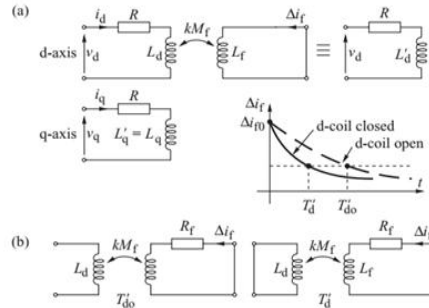


FIGURE 2.5 – Circuits couplés suivant les axes d et q dans l'état transitoire. (a) : pour la détermination de l'inductance de transition. (b) : pour la détermination de la constante de temps transitoire [13]

Dans cet état, les équations du circuit pour l'axe-d sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & sKM_f \\ sKM_f & sL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ \Delta i_f \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Où s est la dérivée par rapport au temps.

En éliminant Δi_f , on trouve :

$$v_d = (R + sL_d)i_d \quad (2.39)$$

Où l'inductance de transition suivant l'axe-d est :

$$L'_d = L_d - \frac{K^2 M_f^2}{L_f} \quad (2.40)$$

Et la réactance transitoire sur l'axe-d est donnée par :

$$X'_d = \omega L'_d \quad (2.41)$$

Et sur l'axe en quadrature :

$$L'_d = L_d \quad (2.42)$$

Et la réactance transitoire sur l'axe-q est donnée par :

$$X'_q = \omega L'_q = X_q \quad (2.43)$$

On définit deux grandeurs temporelles dans cet état :

- La constante de temps de transition en circuit ouvert suivant l'axe-d :

$$T'_{do} = \frac{L_f}{R_f} \quad (2.44)$$

- La constante de temps de transition en court-circuit suivant l'axe-d :

$$T'_d = \left(L_f - \frac{K^2 M_f^2}{L_d} \right) \cdot \frac{1}{R_f} = T'_{do} \frac{L'_d}{L_d} \quad (2.45)$$

2.3.4.3 état subtransitoire

Cet état est décrit par la figure suivante :

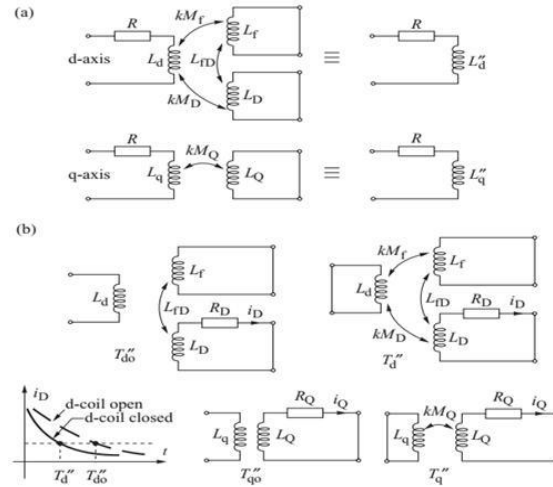


FIGURE 2.6 – Circuits couplés suivant les axes d et q dans l'état subtransitoire. (a) : pour la détermination de l'inductance de l'état subtransitoire. (b) pour la détermination de la constante de temps [13]

Suivant l'axe-d la matrice pour les circuits couplés est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & sKM_f & sKM_D \\ sKM_f & sL_f & sL_{fD} \\ sKM_D & sL_{fD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ \Delta i_f \\ i_D \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

En résolvant l'équation (2.31) on trouve :

$$v_d = (R + sL_d'')i_d \quad (2.47)$$

Avec :

$$L_d'' = L_d - \left[\frac{K^2 M_f^2 L_D + K^2 M_D L_f - 2KM_f M_D L_{fD}}{L_D L_f - L_{fD}^2} \right] \quad (2.48)$$

et :

$$X_d'' = \omega L_d'' \quad (2.49)$$

Dans l'axe en quadrature une équation similaire à l'équation (2.40) pour la réactance en état transitoire dans l'axe-d donne :

$$X_q'' = \omega L_q'' \quad (2.50)$$

Avec :

$$L_q'' = L_q'' - \frac{K^2 M_Q^2}{L_Q} \quad (2.51)$$

Comme pour l'état transitoire, la constante de temps suivant l'axe-direct peut être établie pour la chute de courant dans les enroulements en utilisant les circuits équivalents de la figure précédente; on a :

$$T_{do}'' = \left(L_D - \frac{L_{fD}^2}{L_f} \right) \cdot \frac{1}{R_D} \quad (2.52)$$

Et :

$$T_d'' = \left(L_D - \left[\frac{K^2 M_f^2 L_D + K^2 M_D L_f - 2K M_f M_D L_{fD}}{L_D L_f - L_{fD}^2} \right] \right) \frac{1}{R_D} \quad (2.53)$$

Où T_{do}'' et T_d'' sont les constante de temps suivant l'axe-d de l'état sous transitoire en circuit ouvert et en cours circuit respectivement.

2.3.5 Les équations du générateur synchrone dans les différents états de fonctionnement

Nous avons jusqu'ici établie les relations entre les différents paramètres des circuits couplés avec les réactances du générateur et les constantes de temps en négligeant les f.e.m de transformation des armatures. Passons maintenant à une exami-nassions plus profonde en vue d'établir des expressions plus significatives.

2.3.5.1 Fonctionnement dans l'état stable

Dans cet état le courant du champ d'enroulement est constant et $i_D = i_Q = 0$, les équations (2.26) et (2.27) deviennent :

$$\psi_d = L_d i_d + K M_f i_f \quad (2.54)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (2.55)$$

En substituant l'équation (2.38) et (2.39) dans l'équation (2.23) des tensions, on a :

$$v_d = -R i_d - X_q i_q \quad (2.56)$$

$$v_q = -R i_q + X_d i_q + e_q \quad (2.57)$$

avec $e_q = \omega K M_f i_f$ qui correspond à la tension des armatures induites par le champ du courant if en circuit-ouvert.

Lorsque $i_d = 0$ alors :

$$e_q = \omega K M_f i_f = \omega \frac{K M_f}{L_f} \psi_{f(i_d=0)} \quad (2.58)$$

2.3.5.2 Fonctionnement dans l'état transitoire

Dans cet état, le flux des armatures a pénétré dans les bobines d'amortissement et les courants d'amortissement ont chuté jusqu'à une valeur relativement petit. Les équations du flux deviennent :

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & KM_f \\ KM_f & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (2.60)$$

Tandis que :

$$\dot{\psi}_f = v_f - R_f i_f \quad (2.61)$$

et

$$\begin{cases} v_d = -R i_d - \omega \psi_q \\ v_q = -R i_q - \omega \psi_d \end{cases} \quad (2.62)$$

Considérons d'abord les équations des tensions des armatures et en particulier la tension sur l'axe en quadrature. En résolvant l'équation (2.59) avec pour inconnues ψ_d et ψ_q et en substituant les résultats dans l'expression de v_q de l'équation (2.61) on trouve :

$$v_q = -R i_q + \omega \left[i_d \left(L_d - \frac{K^2 M_f^2}{L_f} \right) + \frac{K M_f}{L_f} \psi_f \right] \quad (2.63)$$

De cette équation on définit un terme appelé f.e.m de l'état transitoire de l'axe en quadrature donné par :

$$e'_q = \omega \frac{K M_f}{L_f} \psi_f \quad (2.64)$$

Cette f.e.m est comparable avec la f.e.m suivant l'axe-q de l'état stable.

Les différents champs de flux de liaison devant rester constants pendant une courte durée après la perturbation, seul ψ_f varie lentement .

En exploitant l'inductance et la f.e.m transitoires et en supposant que $\omega \approx \omega_s$,
 on a :

$$v_q = -Ri_q + X_d''i_d + e_d' \quad (2.65)$$

Et

$$v_d = -Ri_d + X_q''i_q \quad (2.66)$$

Cette dernière équation bien que correcte pour le modèle de rotor choisi, n'est pas toujours valable pour certains turbogénérateurs dont le corps du rotor est fait d'acier solide agissant comme écran sur l'axe-q. On introduit alors une bobine court-circuitée sur l'axe-q, ainsi l'équation suivant l'axe-q devient :

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & KM_g \\ KM_g & L_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_g \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Avec changement dans le champ du flux de liaison, on définit une équation différentielle additionnelle donnée par :

$$\dot{\psi}_g = v_g - R_g i_g = -R_g i_g (v_g = 0) \quad (2.68)$$

La similarité avec l'axe-d permet d'écrire :

$$v_d = -Ri_d + X_q''i_q + e_d' \quad (2.69)$$

Où $X_q'' \neq X_q$ et :

$$e_d' = \omega \frac{KM_g}{L_g} \psi_g \quad (2.70)$$

Dans le souci de relier l'équation différentielle du flux de liaison aux armatures, on combine les équations (2.59) et (2.61) pour montrer que :

$$v_f = \dot{\psi}_f + \frac{R_f}{L_f} \psi_f - R_f \frac{KM_f}{L_d} i_d \quad (2.71)$$

Et l'équation (2.64) devient :

$$\dot{e}'_q = \omega \frac{KM_f}{L_f} \dot{\psi}_f \quad (2.72)$$

Et cette dernière une fois réarrangée et introduite dans l'équation (2.71) donne :

$$e_f = \dot{e}'_q T''_{do} + e'_q - (X_d - X''_d) i_d \quad (2.73)$$

Où e_f est donnée par :

$$e_f = \omega \frac{KM_f v_f}{R_f} \quad (2.74)$$

L'équation (2.73) réarrangée nous permet d'écrire :

$$\dot{e}'_q = \frac{e_f - e'_q - (X_d - X''_d) i_d}{T''_{do}} \quad (2.75)$$

Une analyse similaire nous permet d'écrire aussi :

$$\dot{e}'_d = \frac{-e'_d - (X_q - X''_q) i_d}{T''_{qo}} \quad (2.76)$$

Mais sans bobine additionnelle, $X'_q = X_q$ et $e'_d = 0$

2.3.5.3 Fonctionnement dans l'état subtransitoire

Dans cet état, l'équation (2.36) des tensions est modifiée à cause du couplage avec les circuits du rotor dans les deux axes d et q. L'équation du flux suivant l'axe-d est donnée par :

$$\psi_d = L_d'' i_d + (K_1 \psi_f + K_2 \psi_D) \quad (2.77)$$

$$\text{Où } K_1 = \frac{KM_f L_D - KM_D L_f D}{L_f L_D - L_f^2 D} \text{ et } K_2 = \frac{KM_D L_f - KM_f L_f D}{L_f L_D - L_f^2 D}$$

Qui une fois remplacée dans l'équation (2.36) donne :

$$v_q = -R i_q + X_d'' i_d + e_q'' \quad (2.78)$$

Où e_q'' correspond à une tension d'armature proportionnelle au flux de liaison du rotor suivant l'axe-d et donnée par :

$$e_q'' = \omega (K_1 \psi_f + K_2 \psi_D) \quad (2.79)$$

Une analyse similaire sur l'axe-q nous permet d'écrire :

$$v_d = -R i_d + X_q'' i_q + e_d'' \quad (2.80)$$

La décroissance du flux à travers les amortissements de l'axe-d est donnée par :

$$\dot{\psi}_D = -R_D i_D \quad (2.81)$$

En explicitant i_D de l'équation (2.26) on peut écrire :

$$\dot{\psi}_D = K_2 i_D + \frac{1}{T_{do}''} \cdot \frac{L_{fD}}{L_f} \psi_f - \frac{1}{T_{do}''} \psi_D \quad (2.82)$$

En dérivant l'équation (2.62) on a :

$$\dot{e}_q'' = \omega K_2 \dot{\psi}_D \quad (2.83)$$

car ψ_f est constant durant l'état subtransitoire.

La relation entre \dot{e}_q'' et e_q'' transforme l'équation (2.82) en :

$$\dot{e}_q'' = \frac{e_q' + (X_d'' - X_d')i_d - e_q''}{T_{do}''} \quad (2.84)$$

Une analyse identique nous permet d'écrire :

$$\dot{e}_d'' = \frac{e_d' + (X_q'' - X_q')i_q - e_d''}{T_{qo}''} \quad (2.85)$$

2.3.6 Modèle d'ordre-6 du générateur synchrone

Les différentes équations retrouvées précédemment peuvent être utilisées pour modéliser un générateur synchrone.

La façon dont le flux des armatures pénètre progressivement dans le rotor pendant un défaut en affectant les f.e.m est décrite par les équations (2.84), (2.85), (2.75) et (2.76). Et le circuit équivalent du générateur avec les résistances négligeables est le suivant :

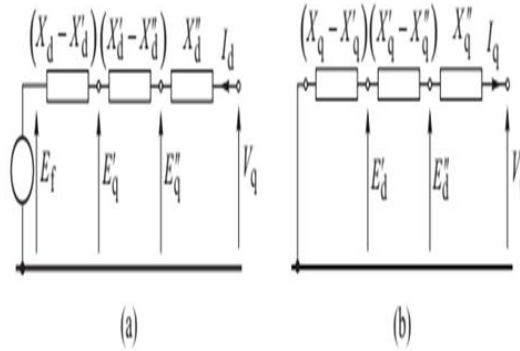


FIGURE 2.7 – Circuit équivalent du générateur avec résistances négligeables. (a) : axe-d, en (b) : axe-q [13]

Ces différentes équations différentielles sont exprimées dans la phase orthogonale par :

$$\left\{ \begin{array}{l} T'_{do} \dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d(X_d - X'_d) \\ T'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d - I_q(X_q - X'_q) \\ T''_{do} \dot{E}''_q = E'_q - E''_q - I_d(X'_d - X''_d) \\ T''_{qo} \dot{E}''_d = E'_d - E''_d + I_q(X'_q - X''_q) \end{array} \right. \quad (2.86)$$

Mais ces équations s'avèrent être insuffisante pour décrire entièrement le comportement du générateur. Il faut y associer les équations électromécaniques données par [13] :

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\Delta\omega) \quad (2.87)$$

Et :

$$\omega_0\Delta\omega = \omega_0(\omega - \omega_s) = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.88)$$

Où : P_m est la puissance mécanique de la turbine,

P_e la puissance électrique,

D le coefficient d'amortissement,

ω est la vitesse de rotation du générateur,

ω_s est la vitesse synchrone

$\Delta\omega$ est l'écart de vitesse donné par $\omega - \omega_s$

En rassemblant les équations (2.86), (2.87), (2.88) tout en négligeant le coefficient d'amortissement D , nous obtenons le modèle d'ordre-6 [13] du générateur synchrone.

Le modèle d'ordre 6 du générateur synchrone est donc représenté par les 6 équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} M\Delta\dot{\omega} = P_m - P_e \\ \dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega \\ T'_{do}\dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d(X_d - X'_d) \\ T'_{qo}\dot{E}'_d = -E'_d - I_q(X_q - X'_q) \\ T''_{do}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q - I_d(X'_d - X''_d) \\ T''_{qo}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + I_q(X'_q - X''_q) \end{array} \right. \quad (2.89)$$

Avec :

$$P_e = (E'_d I_d + E'_q I_q) + (X''_d - X''_q) I_d I_q \quad (2.90)$$

C'est donc ce modèle qui fera l'objet de notre étude.

2.4 Conversion des systèmes dynamiques en systèmes électroniques

L'intégration des systèmes d'équations différentielles peut s'avérer parfois très complexe. Il a donc été mis sur pied des approches électroniques permettant de suivre l'évolution temporelle des différentes variables d'états d'un système dynamique. Parmi les logiciels électroniques exploités pour cette approche, nous allons nous intéresser au logiciel Matlab Simulink.

2.4.1 Symboles des opérateurs dans Matlab Simulink

L'interface Matlab Simulink offre un ensemble de d'opérateurs permettant l'intégration des équations différentielles. On peut citer entre autres :

a) la constante

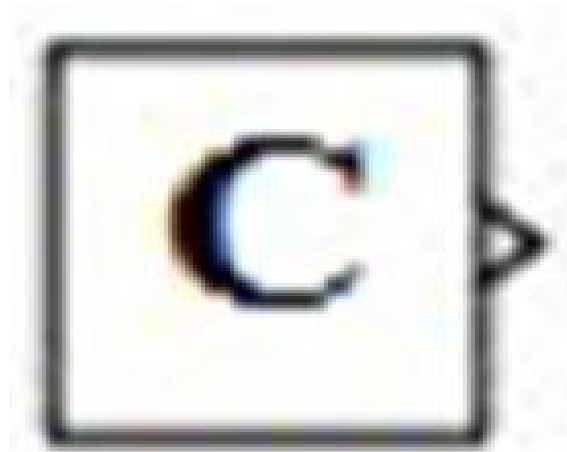


FIGURE 2.8 – Symbole d'une constante dans Simulink.

b) Le Gain

Il sera utilisé pour représenter une constante (beta par exemple) multipliant un variable dans une équation. Son symbole est le suivant :

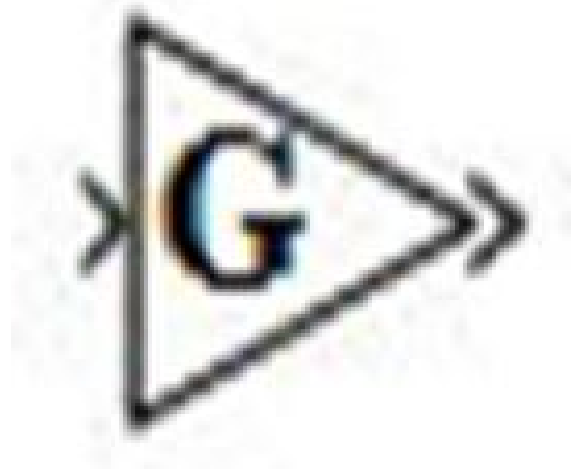


FIGURE 2.9 – Symbole du Gain dans Simulink

c) Le Produit.

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

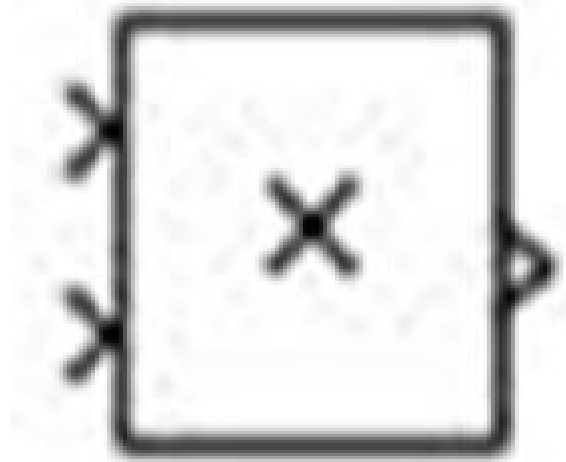


FIGURE 2.10 – Symbole du Produit dans Simulink

d) Le Sommateur.

Il sera utilisé pour additionner plusieurs termes d'une équation. Son symbole est le suivant :



FIGURE 2.11 – Symbole du Sommateur dans Simulink

e) L'intégrateur.

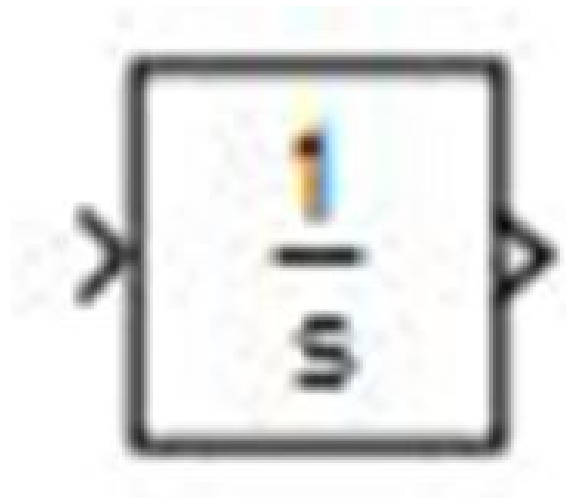


FIGURE 2.12 – Symbole de l'intégrateur dans Simulink

2.4.2 Principe de câblage des équations dans Matlab Simulink

Pour câbler une équation à l'aide du logiciel Matlab Simulink il faut : - Identifier dans l'équation les variables d'état. Ce sont les paramètres du système dynamiques qui évoluent avec le temps.

-Identifier les constantes

-Identifier les différents gains à ne pas confondre avec les constantes. Un gain est un coefficient constant qui multiplie une variable d'état, alors que, une constante est tout simplement un paramètre constant du système dynamique étudié.

- Ensuite, à partir de l'interface Simulink, appliquer l'opérateur approprié à l'élément correspondant dans l'équation.

2.4.3 Exemple d'intégration d'une équation dans Matlab Simulink

A titre d'exemple, nous allons câbler la 5eme équation de notre système dynamique dans Matlab Simulink . elle est donnée par :

$$T_{do}'' \dot{E}_q'' = E_q' - E_q'' - I_d(X_d' - X_d'') \quad (2.91)$$

Les variables d'état de notre équation sont : E_q' et E_q''

Nous allons procéder à des changements de variables pour simplifier notre équation. A cet effet, posons :

$$a = \frac{1}{T_{qo}'}, b = \frac{I_d(X_q - X_q')}{T_{qo}'}, x = E_q'' \text{ et } y = E_q'$$

L'équation (2.89) devient :

$$\frac{dx}{dt} = -ax + ay + b \quad (2.92)$$

Pour câbler notre équation, nous aurons besoin :

- D'un intégrateur pour intégrer la variable x
- De deux gains de même valeur a, pour multiplier les variables x et y
- D'une constante de valeur b
- D'un sommateur pour additionner les différents termes de notre équation.

En appliquant donc ces différentes étapes, le schéma bloc électronique dans Matlab Simulink, qui intègre l'équation (2.89) est le suivant :

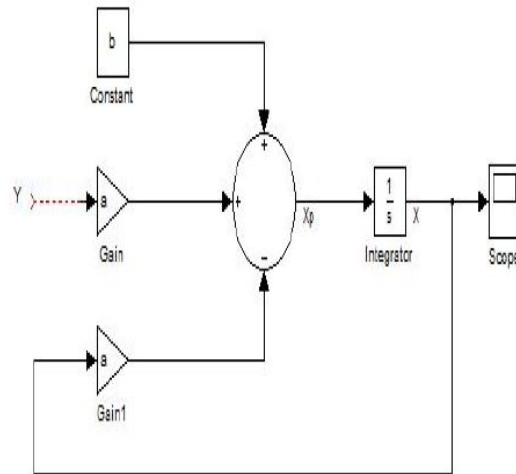


FIGURE 2.13 – Schéma électronique de l'équation (2.89) dans MAtlab Simulink

conclusion

Ce chapitre nous permis de développer les éléments d'étude d'un système dynamique et de quelques composants électroniques pouvant permettre l'intégration des équations différentielles les constituant. Nous avons également mis en exergue un modèle dit modèle d'ordre-6 du générateur synchrone. La suite de notre travail consistera alors à exploiter les méthodes d'approche développées ici, pour une étude du générateur synchrone, vu sous ce modèle.

**IMPLEMENTATION PAR DES SYSTEMES ELECTRONIQUES DU MODELE
D'ORDRE 6 DU GENERATEUR SYNCHROME POUR L'ETUDE DE SA
STABILITE**

Introduction

Pour l'étude du comportement des réseaux d'énergie électriques, l'un des problèmes les plus cruciaux rencontrés souvent est celui de la stabilité [14]. En effet, la demande en électricité dans le monde en général et au Cameroun en particulier ne fait qu'augmenter pour pouvoir faire fonctionner les usines et desservir les ménages. Les réseaux électriques ont bien évidemment connu un développement important. Il est donc devenu urgent d'examiner en tout temps leurs comportements suite à de faibles et/ou de grandes perturbations sur leurs composants notamment les générateurs synchrones qui en sont les principaux composants. Ces perturbations, qui peuvent être d'origine diverses, causent une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation). Dans ce chapitre, nous commencerons par une description du modèle adopté pour le générateur synchrone, suivi de l'étude de la stabilité dudit modèle et enfin nous ferons son analyse numérique dont les résultats permettront une interprétation du comportement du générateur lorsqu'il est soumis à des perturbations.

3.1 Le modèle d'ordre-6 du moteur synchrone

3.1.1 description du modèle

Le modèle d'ordre 6 du générateur synchrone est représenté par les 6 équations suivant [13], obtenues au chapitre 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} M\Delta\dot{\omega} = P_m - P_e \\ \dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega \\ T'_{do}\dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d(X_d - X'_d) \\ T'_{qo}\dot{E}'_d = -E'_d - I_q(X_q - X'_q) \\ T''_{do}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q - I_d(X'_d - X''_d) \\ T''_{qo}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + I_q(X'_q - X''_q) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Avec :

$$P_e = (E''_d I_d + E''_q I_q) + (X''_d - X''_q) I_d I_q \quad (3.2)$$

- La première équation du système (3.1) décrit l'écart de la vitesse angulaire du rotor.
- La seconde décrit la position angulaire du rotor dans le temps.
- La troisième décrit la f.e.m interne transitoire suivant l'axe en quadrature dans le temps.
- La quatrième décrit la f.e.m interne transitoire suivant l'axe direct dans le temps.
- La cinquième décrit la f.e.m interne subtransitoire suivant l'axe en quadrature dans le temps.

• La sixième décrit la f.e.m interne subtransitoire suivant l'axe direct dans le temps.

Signification des termes du système [13]

M : coefficient d'inertie

- $\Delta\omega = \omega - \omega_s$ représente l'écart de vitesse du rotor, avec ω la vitesse angulaire du générateur et

- ω_s la vitesse angulaire synchrone.

- δ : Position angulaire du rotor

- E'_q, E''_q : Composante suivant l'axe q de la f.e.m interne transitoire et subtransitoire respectivement.

- E'_d, E''_d : Composante suivant l'axe d de la f.e.m interne transitoire et subtransitoire respectivement.

- E_f : f.e.m d'excitation

- P_m, P_e : puissance mécanique et électrique respectivement.

- I_d, I_q : Composante du courant d'armature suivant l'axe d et l'axe q respectivement.

- X_d, X'_d, X''_d : Réactance du générateur suivant l'axe d, dans l'état stable, transitoire et subtransitoire respectivement.

- X_q, X'_q, X''_q : Réactance du générateur suivant l'axe q, dans l'état stable, transitoire et subtransitoire respectivement.

- T'_{qo}, T''_{qo} : Constante de temps transitoire et subtransitoire en circuit ouvert suivant l'axe q.

- T'_{do}, T''_{do} : Constante de temps transitoire et subtransitoire en circuit ouvert

suivant l'axe d.

$-\omega_s$: est une constante.

Pour l'étude de notre système dynamique, nous avons les valeurs suivantes [19] pour les différents paramètres, exprimées en per unit (pu) :

$$P_m=2; T'_{do} = 5.773; T'_{qo} = 1.768; T''_{qo} = 0.051; T''_{do} = 0.031; \omega_s = 0.1; M=0.7; I_d = -0.922; I_q = 0.428; X''_d = 0.17; X''_q = 0.17; X'_q = 0.38; X'_d = 0.23; X_d = X_q = 0.17;$$

Nous allons dans la suite étudier la stabilité de notre système dynamique.

3.2 Étude de la stabilité

A partir des valeurs numériques des paramètres du problème, posons :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{P_m}{M} - \frac{(X'_d - X'_q)I_d I_q}{M}, b = \frac{I_d}{M}, c = \frac{I_q}{M} \\ d = \frac{1}{T'_{do}}, e = \frac{E_f + I_d(X_d - X'_d)}{T'_{do}} \\ f = \frac{1}{T'_{qo}}, g = \frac{I_q(X_q - X'_q)}{T'_{qo}} \\ h = \frac{1}{T''_{do}}, i = \frac{I_d(X'_d - X''_d)}{T''_{do}} \\ j = \frac{1}{T''_{qo}}, k = \frac{I_q(X'_q - X''_q)}{T''_{qo}} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Notons que a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, et k sont des constantes réelles. Avec ces changements, les 6 équations qui décrivent notre modèle deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = a - bv - cu = F_1 \\ \frac{dy}{dt} = \omega_0 x = F_2 \\ \frac{dz}{dt} = -dz + e = F_3 \\ \frac{dw}{dt} = -fw - g = F_4 \\ \frac{du}{dt} = -hu + hz + i = F_5 \\ \frac{dv}{dt} = -jv + jw - k = F_6 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Avec la correspondance :

$$\Delta\omega, \delta, E'_q, E'_d, E''_q, E''_d) \Leftrightarrow (x, y, z, w, u, v).$$

3.2.1 Recherche des points fixes

De ce qui précède au chapitre 2 les points d'équilibre du système précédent sont obtenus en résolvant le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} a - bv - cu = 0 \\ \omega_0 x = 0 \\ -dz + e = 0 \\ -fw - g = 0 \\ -hu + hz + i = 0 \\ -jv + jw - k = 0 \end{array} \right. \quad (3.5)$$

La deuxième équation du système (3.4) nous donne :

$$x=0$$

La troisième équation nous donne :

$$z = \frac{e}{d}$$

La quatrième équation nous donne :

$$w = \frac{g}{f}$$

En insérant w dans la sixième on a :

$$v = \frac{g}{f} - \frac{k}{j}$$

En insérant l'expression de z dans la cinquième équation on a :

$$u = \frac{i}{h} + \frac{e}{d}$$

Mais l'inconnue y pouvant prendre toutes les valeurs réelles, on conclut que notre système dynamique a une infinité de points fixes.

3.2.2 Étude de la stabilité du système

Conformément au chapitre 2, la matrice jacobienne de notre système dynamique est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF_1}{dx} & \frac{dF_1}{dy} & \frac{dF_1}{dz} & \frac{dF_1}{dw} & \frac{dF_1}{du} & \frac{dF_1}{dv} \\ \frac{dF_2}{dx} & \frac{dF_2}{dy} & \frac{dF_2}{dz} & \frac{dF_2}{dw} & \frac{dF_2}{du} & \frac{dF_2}{dv} \\ \frac{dF_3}{dx} & \frac{dF_3}{dy} & \frac{dF_3}{dz} & \frac{dF_3}{dw} & \frac{dF_3}{du} & \frac{dF_3}{dv} \\ \frac{dF_4}{dx} & \frac{dF_4}{dy} & \frac{dF_4}{dz} & \frac{dF_4}{dw} & \frac{dF_4}{du} & \frac{dF_4}{dv} \\ \frac{dF_5}{dx} & \frac{dF_5}{dy} & \frac{dF_5}{dz} & \frac{dF_5}{dw} & \frac{dF_5}{du} & \frac{dF_5}{dv} \\ \frac{dF_6}{dx} & \frac{dF_6}{dy} & \frac{dF_6}{dz} & \frac{dF_6}{dw} & \frac{dF_6}{du} & \frac{dF_6}{dv} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Après calcul on obtient :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -c & -b \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h & 0 & -h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j & 0 & -j \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

L'équation associée à la matrice J est la suivante :

$$\lambda^2(-d - \lambda)(-f - \lambda)(-h - \lambda)(-j - \lambda) = 0 \quad (3.8)$$

Et connaissant les valeurs numériques des paramètres du problème, nous trouvons après calcul : $d=0.173$; $f= 0,565$; $h=32,258$; $j=19,607$.

Et après résolution de l'équation (3.8) nous avons les valeurs propres suivantes :

$$\lambda = (0, -0.173, -0.565, -32.258, -19.607)$$

Toutes nos valeurs propres étant négatives ou nulles, on conclut que notre système dynamique est stable.

3.3 Étude numérique de la stabilité du système dynamique

Pour l'étude numérique de notre système, nous avons utilisé l'algorithme de Runge Kutta d'ordre 4 dans Matlab avec un pas d'intégration de 0.05 s et avec les conditions initiales suivantes :

$$x_0 = 0; y_0 = 0.1; z_0 = 1.073; w_0 = -0.522; u_0 = 1.018; v_0 = -0.612$$

Avec la correspondance :

$$\Delta\omega, \delta, E'_q, E'_d, E''_q, E''_d) \Leftrightarrow (x, y, z, w, u, v).$$

Nous avons alors obtenu les résultats suivants :

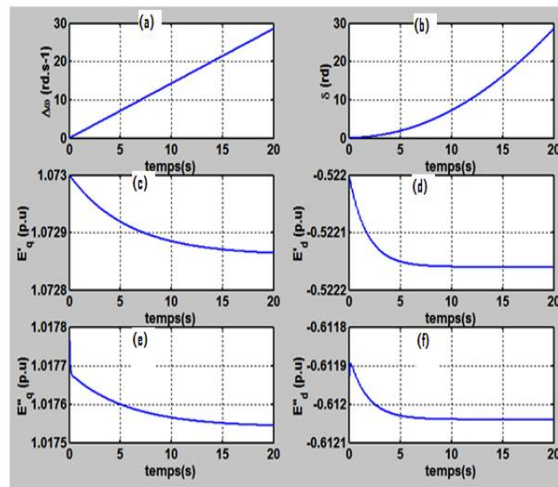


FIGURE 3.1 – Évolution temporelle des différentes variables de notre système dynamique. En (a) : l'écart de vitesse angulaire du rotor ; en (b) : la position angulaire du rotor ; en (c) : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (d) : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe direct ; en (e) : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (f) : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe direct.

Analyse des courbes obtenues

A travers ces résultats nous pouvons faire les commentaires suivants :

- L'écart de vitesse croît pratiquement de façon linéaire et indéfiniment. Ceci signifie que, au fur et à mesure que le temps s'écoule, la vitesse de rotation du générateur s'éloigne de celle du champ tournant. Cet état chose conduirait à un moment donné à une perte total du synchronisme. Il est donc prudent dans le cadre d'utilisation de la machine vue sous ce modèle, de prévoir un système veiller au synchronisme de la machine.

- En ce qui concerne l'évolution temporelle de l'angle du rotor, nous constatons une croissance rapide après un laps de temps où le rotor semble statique. Autrement

dit, après le démarrage du moteur, il faut quelques secondes pour que le rotor se mette en marche.

- En ce qui concerne les forces électromotrices transitoires et subtransitoires, nous remarquons une décroissance, rapide en quelques secondes juste après le démarrage du moteur, environ 5 secondes, puis elles se stabilisent. Ceci signifie que notre système peut être transitoirement stable, même si cet état de stabilité ne peut durer que quelques secondes.

3.4 Approche électronique de la dynamique du système

Au chapitre 2 nous avons présenté les composants électroniques de matlab simulink pouvant permettre de concevoir un circuit électronique représentant tout système dynamique. Nous rappelons ici le système (3.4) qui fait l'objet de notre étude :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = a - bv - cu = F_1 \\ \frac{dy}{dt} = \omega_0 x = F_2 \\ \frac{dz}{dt} = -dz + e = F_3 \\ \frac{dw}{dt} = -fw - g = F_4 \\ \frac{du}{dt} = -hu + hz + i = F_5 \\ \frac{dv}{dt} = -jv + jw - k = F_6 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

3.4.1 Câblage individuel de chaque équation du système dynamique

Nous allons utiliser le principe de câblage développé au chapitre 2 pour établir le circuit électronique représentant chaque équation de notre système, avant de les associer à la fin pour obtenir le circuit bloc final. Notons que l'indice p attribué à

une variable signifiera simplement qu'il s'agit de sa dérivée par rapport au temps.

a-) cas de la Première équation du système dynamique

Elle est donnée par :

$$\frac{dx}{dt} = a - bv - cu \tag{3.10}$$

Les variables d'état sont x , v et u ; b et c multipliant des variables sont alors des gains, alors que a est une constante. Pour obtenir le circuit correspondant on a eu besoin :

- De deux gains de valeurs b et c
- D'une constante de valeur a
- D'un intégrateur
- D'un sommateur
- D'un oscilloscope

Le circuit bloc est alors représenté par la figure suivante :

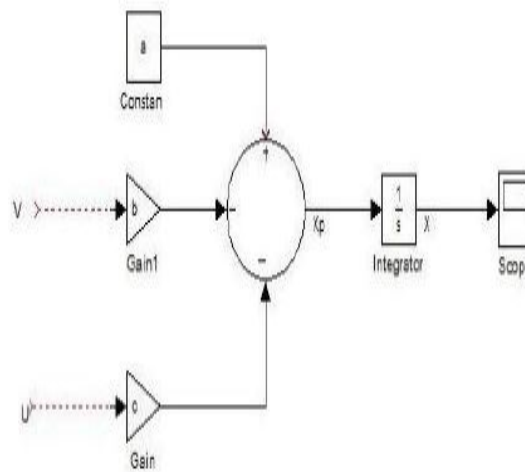


FIGURE 3.2 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la première équation du système dynamique.

b-) cas de la deuxième équation du système dynamique

Elle est donnée par :

$$\frac{dy}{dt} = \omega_0 x \quad (3.11)$$

Ici, nous avons deux variables d'état x et y ; et w0 qui multiplie la variable x est un gain. Nous avons donc eu besoin :

- D'un gain de valeur w0
- D'un intégrateur
- D'un oscilloscope

Le sommateur n'étant pas important dans la mesure où il n'ya pas plusieurs termes à sommer dans le second membre de l'équation.

Le circuit bloc est alors représenté par la figure suivante :



FIGURE 3.3 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la deuxième équation du système dynamique.

c-) cas de la troisième équation

Elle est donnée par :

$$\frac{dz}{dt} = -dz + e \quad (3.12)$$

Nous avons dans ce cas, une seule variable d'état : z ; un gain d, car d multiplie la variable d'état ; et une constante e. Pour l'intégrer dans SIMULINK, nous avons eu besoin :

- D'un gain de valeur d
- D'une constante de valeur e
- D'un intégrateur
- D'un sommateur
- D'un oscilloscope

Alors le schéma bloc est le suivant :

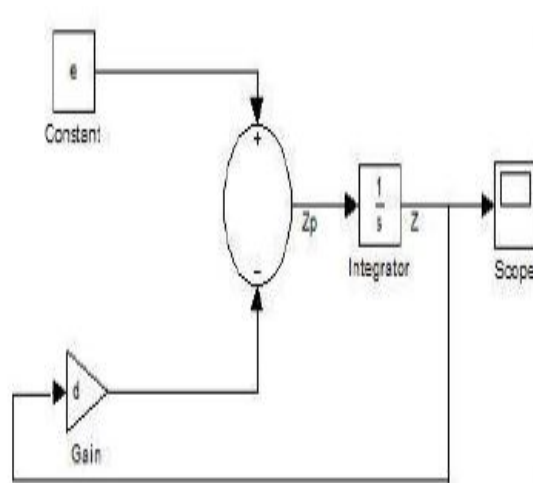


FIGURE 3.4 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la troisième équation du système dynamique.

d-) cas de la quatrième équation Elle est la suivante :

$$\frac{dw}{dt} = -fw - g \tag{3.13}$$

Dans cette équation, nous retrouvons une seule variable d'état w, un gain f et une constante g. pour l'intégrer dans SIMULINK, nous avons eu besoin des composants suivants :

- D'un gain de valeur f.
- D'une constante de valeur g
- D'un intégrateur

- D'un sommateur
- D'un oscilloscope

Le schéma bloc est alors le suivant :

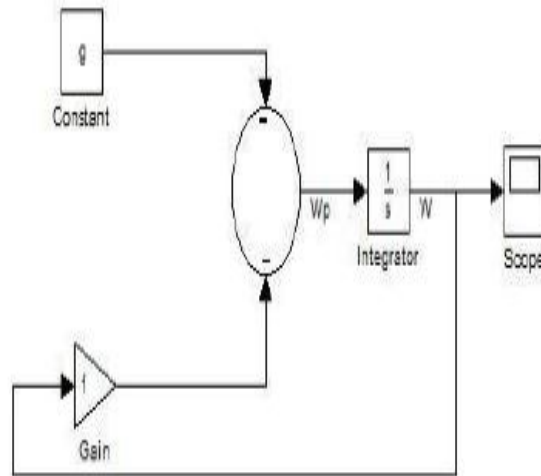


FIGURE 3.5 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la quatrième équation du système dynamique.

e-) cas de la cinquième équation Elle est donnée par :

$$\frac{du}{dt} = -hu + hz + i \quad (3.14)$$

Ici nous avons deux variables d'état qui sont u et z, deux gains, et une constante.

Pour son intégration dans SIMULINK, nous avons utilisé :

- Deux gains de même valeur h
- Une constante de valeur i
- Un intégrateur
- Un sommateur
- Un oscilloscope.

Le schéma bloc obtenu est alors le suivant :

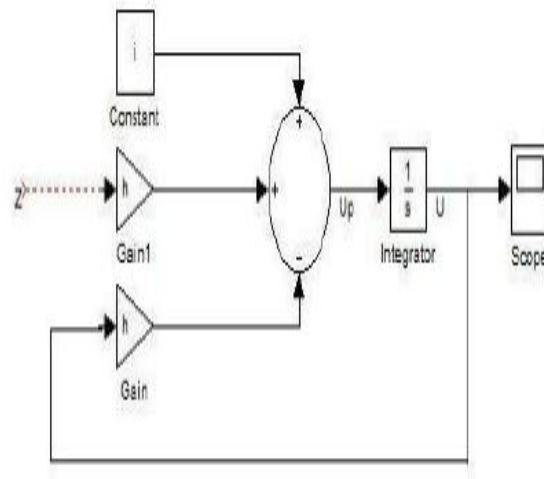


FIGURE 3.6 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la cinquième équation du système dynamique.

f-) cas de la sixième et dernière équation Elle est la suivante :

$$\frac{dv}{dt} = -jv + jw - k \tag{3.15}$$

Nous avons ici deux variables d'état v et w; deux gains et une constante. Son intégration dans SIMULINK nous a demandé les composants suivants :

- Deux gains de même valeur j
- Une constante de valeur k
- Un intégrateur
- Un sommateur
- Un oscilloscope

Le schéma bloc obtenu est le suivant :

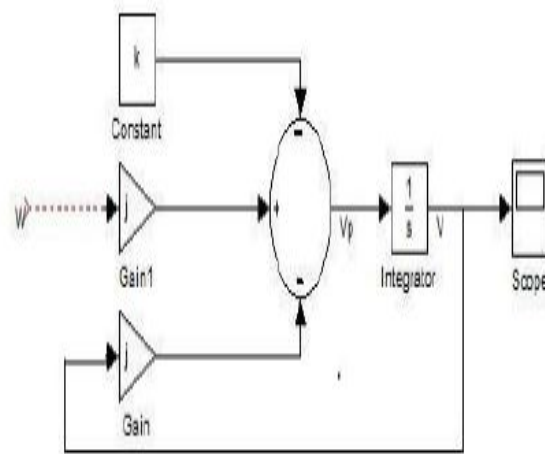


FIGURE 3.7 – schéma bloc électronique dans MATLAB SIMULINK de la sixième équation du système dynamique.

3.4.2 Circuit électronique du bloc final et simulation

Schéma bloc :

Les étapes précédentes nous ont permis de ressortir les différents circuits individuels relatifs à chaque équation de notre système dynamique. Pour obtenir le circuit bloc électronique final, il suffit de relier les différents circuits entre eux en respectant les relations qui relient les différentes variables. Ainsi, nous avons obtenu le circuit bloc électronique suivant :

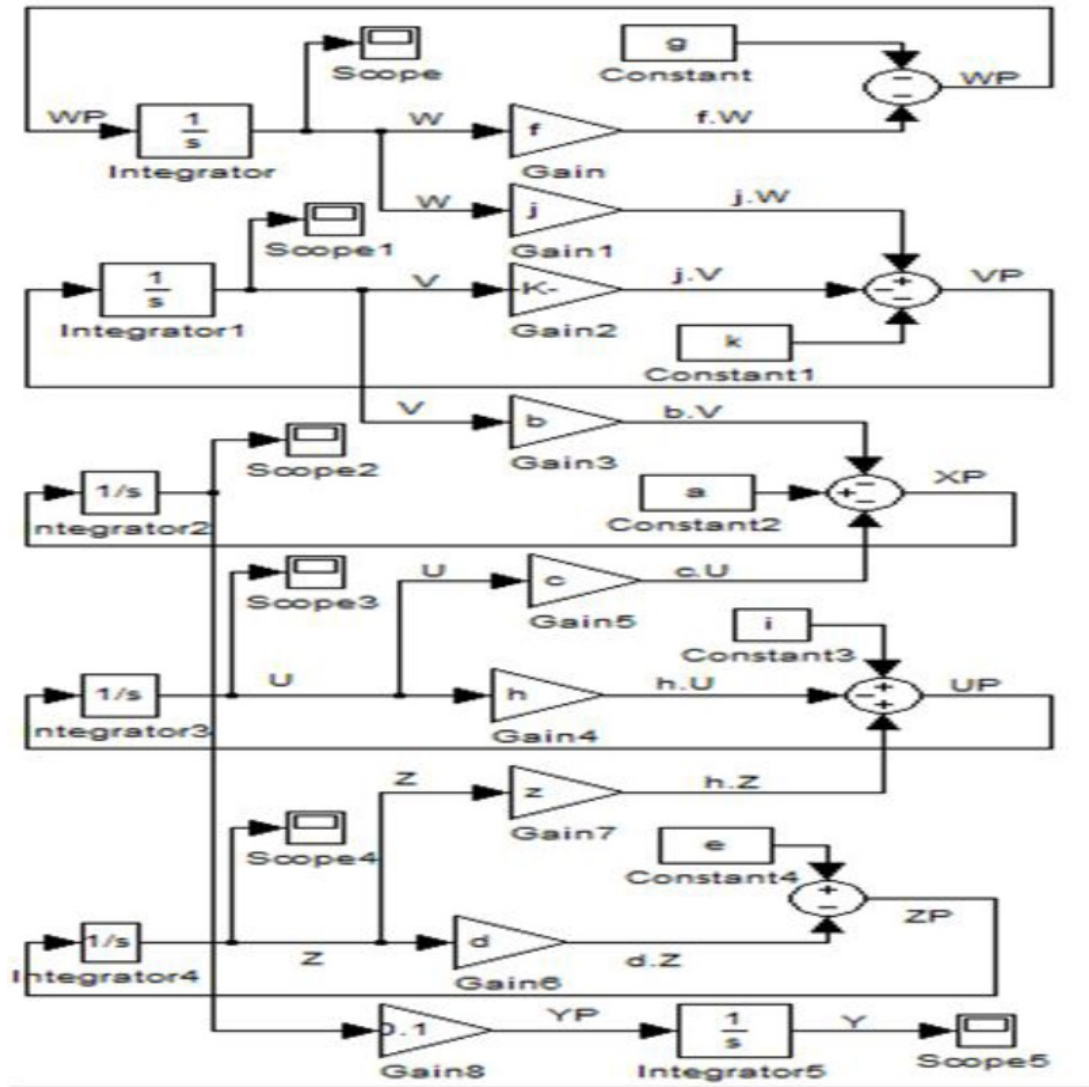


FIGURE 3.8 – schéma bloc matlab simulink du modèle d'ordre-6 du générateur synchrone

Simulation :

La simulation de ce circuit bloc dans matlab simulink, avec un pas d'intégration de 0.05 seconde sur une durée de 20 secondes nous a donné les courbes suivantes :

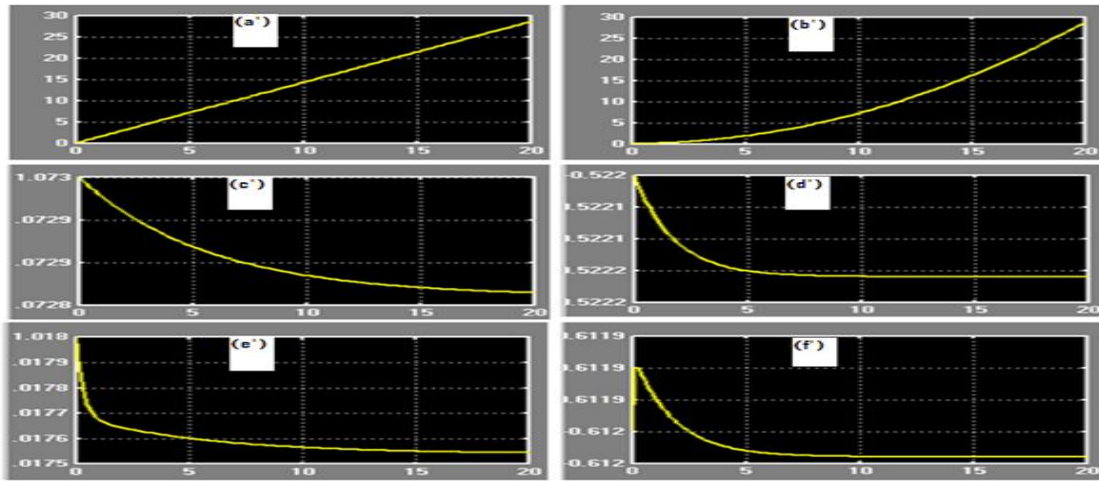


FIGURE 3.9 – Évolution temporelle des différentes variables de notre système dynamique dans matlab simulink. En (a') : différence de vitesse angulaire ; en (b') : la position angulaire du rotor ; en (c') : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (d') : la f.e.m transitoire interne suivant l'axe direct ; en (e') : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe en quadrature ; en (f') : la f.e.m subtransitoire interne suivant l'axe direct.

Comparaison des résultats

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les résultats obtenus par simulation du système dans matlab et ceux obtenus grace au schéma bloc électronique dans matlab simulink :

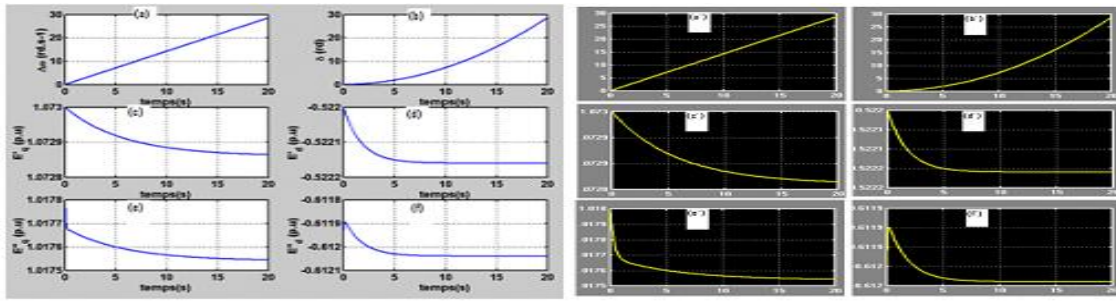


FIGURE 3.10 – Comparaison des courbes obtenues par analyse numérique dans matlab en bleu et celles obtenues dans matlab simulink en jaune.

Nous constatons une concordance indiscutable entre les deux résultats, ce qui confirme bien la fiabilité de notre système électronique qui décrit le modèle d'ordre-6 du générateur synchrone. Il est donc possible de concevoir un système électronique dont l'étude permettra de suivre le comportement du générateur synchrone installé dans un réseau électrique.

conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons étudié la dynamique du générateur synchrone. Pour cette étude, nous avons dans un premier temps modélisé la dynamique du générateur à partir d'un certains nombres de variables électriques. L'étude de la stabilité du système obtenu nous a conduit à une infinité de points fixes. Nous avons complété notre étude par une analyse numérique avec le logiciel Matlab qui nous a permis d'observer l'évolution dans le temps des différentes variables du système dynamique décrivant le générateur synchrone. La simulation du circuit électronique

conçu pour décrire le modèle avec l'application Simulink de Matlab a permis de confirmer les résultats obtenus.

introduction

La formation des Professeurs des Lycée d'Enseignement Général (PLEG) au Cameroun s'achève par la présentation d'un mémoire portant sur un sujet d'étude, propre à chaque filière de formation. Le sujet traité doit ressortir des aspects pédagogiques et didactiques relatives au métier qui nous attend sur le terrain. Dans cette partie nous allons présenter une fiche pédagogique qui établit un lien entre la recherche menée dans ce travail et les enseignements, notamment les sciences physiques et technologiques, que nous devons dispenser sur le triangle national et partout ailleurs. Par la suite nous illustrerons quelques intérêts didactiques relatifs à notre sujet.

- Fiche pédagogique

Nous avons conçu une fiche pédagogique comportant un ensemble de questions portant sur les moteurs à courant continu et la production du courant alternatif. Cette fiche permettra à un élève des classes de 3ème et 1ere scientifique de consolider leurs connaissances sur les moteurs à courant continu et sur la notion de production du courant alternatif. Objectif général : fonctionnement d'un moteur à courant continu ; connaître le rôle joué par un alternateur (générateur) dans une centrale hydroélectrique dans le processus de production du courant alternatif.

Question n°1 : qu'est ce qu'un moteur à courant continu? Réponse : c'est organe capable de mettre un corps en mouvement et qui fonctionne grâce au courant continu.

Question n°2 : citer les 2 principales parties d'un moteur à courant continu Réponse : la partie fixe encore appelée stator, et la partie mobile encore appelée rotor.

Question n°3 : avez-vous déjà rencontré un objet avec un moteur à courant continu ? si oui, lequel? Réponse : oui, dans les jouets d'enfants, fonctionnant grâce aux piles.

Question n°4 : dans un moteur à courant continu, quelle est le système qui assure la rotation du rotor ? Réponse : le système balai collecteur.

Question n°5 : qu'est ce qu'un alternateur ? et où les rencontre-t-on fréquemment ? Réponse : c'est un dispositif permettant la production du courant alternatif. On les rencontre en général dans les centrales hydroélectriques, même sur les bicyclettes.

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 apparait 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.

Question n°7 : citer quelques barrages hydroélectriques qu'on rencontre au Cameroun. Réponse : Lom pangar, Mekin etc

- 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 3eme. 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.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre notre travail, il a été question de concevoir un circuit électronique permettant d'analyser le comportement dynamique du modèle 6-D d'un générateur synchrone. Dans un premier temps nous avons présenté un parcours panoramique sur les machines synchrones. Nous avons ressorti les principaux éléments de sa constitution ainsi que son fonctionnement. Nous avons également mis en exergue les différents types de machines synchrones, ses différents modes de fonctionnement, ses applications et les avantages et inconvénients relatives à son utilisation. Dans un second temps, nous avons mis un accent sur l'étude des systèmes dynamiques, et ceci nous a permis de ressortir les éléments et théorèmes mathématiques nécessaires pour l'étude de la stabilité des systèmes dynamiques. Par la suite, nous avons dégagé, sur la base de quelques hypothèses simplificatrice, un modèle mathématique décrivant le générateur synchrone par des équations. En outre, nous avons établie une relation directe entre les systèmes dynamiques et les circuits électroniques, ceci à travers des composants disponibles dans certains logiciels tels que Matlab Simulink. Et enfin, nous avons simulé notre système dynamique grâce au logiciel Matlab, pour observer les variations temporelles de ses différents paramètres. L'implémentation du circuit électronique équivalent de notre modèle d'ordre-6 du générateur s'est faite dans le logiciel Matlab Simulink. La concordance des courbes obtenues à travers ce circuit

par simulation avec celles obtenues dans Matlab nous a permis de conclure sur la fiabilité de notre circuit électronique. Dans un futur proche, il sera question pour nous d'implémenter notre système dynamique à travers d'autres logiciels apportant plus de détails sur les paramètres du modèles, tels que le logiciel Pspice, et également, faire varier certains paramètres de notre système afin d'étudier l'impact de la tension d'excitation sur la stabilité du générateur synchrone.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre notre travail, il a été question de concevoir un circuit électronique permettant d'analyser le comportement dynamique du modèle 6-D d'un générateur synchrone. Dans un premier temps nous avons présenté un parcours panoramique sur les machines synchrones. Nous avons ressorti les principaux éléments de sa constitution ainsi que son fonctionnement. Nous avons également mis en exergue les différents types de machines synchrones, ses différents modes de fonctionnement, ses applications et les avantages et inconvénients relatives à son utilisation. Dans un second temps, nous avons mis un accent sur l'étude des systèmes dynamiques, et ceci nous a permis de ressortir les éléments et théorèmes mathématiques nécessaires pour l'étude de la stabilité des systèmes dynamiques. Par la suite, nous avons dégagé, sur la base de quelques hypothèses simplificatrice, un modèle mathématique décrivant le générateur synchrone par des équations. En outre, nous avons établie une relation directe entre les systèmes dynamiques et les circuits électroniques, ceci à travers des composants disponibles dans certains logiciels tels que Matlab Simulink. Et enfin, nous avons simulé notre système dynamique grâce au logiciel Matlab, pour observer les variations temporelles de ses différents paramètres. L'implémentation du circuit électronique équivalent de notre modèle d'ordre-6 du générateur s'est faite dans le logiciel Matlab Simulink. La concordance des courbes obtenues à travers ce circuit

par simulation avec celles obtenues dans Matlab nous a permis de conclure sur la fiabilité de notre circuit électronique. Dans un futur proche, il sera question pour nous d'implémenter notre système dynamique à travers d'autres logiciels apportant plus de détails sur les paramètres du modèles, tels que le logiciel Pspice, et également étudier l'impact du courant d'excitation sur la stabilité du générateur synchrone.

Annexe

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques détails de calcul que nous avons introduit dans notre mémoire.

Annexe 1 :

Bibliographie

- [1] KAMEL SAOUDI, 2014 *stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques*,(Thèse de Doctorat, faculté de technologie, Université FERHAT ABBAS-SETI1 , ALGERIE)
- [2] XIAPING TU, *contribution à la modélisation et à la simulation de la machine synchrone soumise à des défauts internes*, (Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec.).
- [3] B. MULTON, 2004 "*préparation à l'agrégation de génie électrique*,(école normale supérieure de Cachan)
- [4] B.BELARBI et all, 2004"*commande numérique en vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents*,(Revue périodique)
- [5] B.BAYALA , *machine synchrone, cours d'électrotechnique à l'intention des ingénieurs, électrotechniciens et techniciens supérieurs*
- [6] BENDAOUUD , *cours machines électriques à courant alternatif*,(université de sidi Bel Abbès).
- [7] A.HASSINA, *étude expérimentale de la position rotorique d'une machine synchrone à aimants permanents par variables électriques* , (mémoire de magistère en électronique)

- [8] L. CHELOT, 2000, "*alterno démarreur intégré. Machine à rotor bobiné*," Projet de fin d'étude d'ingénieur-valéo. Systèmes électriques,(université de technologie de Compiègne)
- [9] image Google,consulté le 26 mai 2016 à 21h10 "*moteur synchrone*
- [10] M. OUBIBAR et all, 2010" *Machine synchrone/ asynchrone*," (projet de fin d'étude en ingénierie dans le cadre du programme en génie électromécanique,université du Quebec en Abitibi-Témiscamingue)
- [11] image Google,consulté le 26 mai 2016 à 21h15, "*centrale hydroélectrique*
- [12] L.H. Strogatz, 1994, "*Non linear dynamique and chaos*,[Livre] : Addison-Wesley,
- [13] D. Delignieres, 2010, "*Cours de Dynamique et morphogenèse* ,(Cours de maîtrise, Option recherche)
- [14] J. Le Bourlot, 2008-2009, "*cours d'introduction aux systèmes dynamiques dissipatifs*," (Master Astronomie et Astrophysique, Observatoire de paris)
- [15] N. Nana, 2010, "*Cours de Dynamique des structures mécaniques non linéaire continues* ,"(Master II, UY1)
- [16] T.C. Kofane, 2011, *Cours de système dynamique et chaos* (Cours de Master II, UY1)
- [17] S. Noubissie, 2012, "*Cours des systèmes dynamiques et chaos*," (Master II physique, Université de Dschang).
- [18] H. B. Fotsin, 2007, "*Cours d'automatique* ," (Master I physique, Université de Dschang)
- [19] J. Machowski et all, 2008 , "*power system dynamics, stability and control* ," second édition.