

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique

Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
En Electrotechnique
Thème

La stabilité statique des réseaux électriques

Présenté par :

- Melle HASSANI Aicha
- Melle FARHI Yasmine

Proposé par :

Dr.M.AMOROUAYECHE
Chargé de missions auprès
de l'opérateur système

Juin 2011

Ecole National polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie

Remerciements

Nos remerciements les plus sincères et les plus chaleureux, vont à notre promotrice Mademoiselle MERIEM AMOROUAYACHE, chargée de mission à l'Opérateur Système du Groupe SONELGAZ, pour son aide, son orientation judicieuse, sa disponibilité, également pour la confiance, la patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifestées tout au long de notre projet.

Nous tenons également à exprimer notre extrême reconnaissance aux honorables membres du jury.

A travers ce mémoire, nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants de l'école nationale polytechnique en particulier à ceux du département de génie électrique ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis le cycle primaire.

N'oublions pas tous les amis et les collègues qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous ne pouvons manquer de remercier nos familles respectives pour leur compréhension et leur soutien sans faille.

Dédicaces

A celle qui m'a toujours soutenu dans les moments les plus difficiles, ma sœur, mon amie et ma confidente.

...A ma mère.

A celui qui a su m'orienter et me guider dans ma vie, celui qui m'a appris la signification des mots « responsabilité et autonomie ».

...A mon père.

A mes frères et mes belles sœurs pour leurs soutiens et leur confiance en mes capacités.

A mes chères cousines qui étaient depuis toujours mes sœurs et amies, chacune par son nom, Hassani Amira ; Koudri Hadjer et Benchaoui Radja.

A mon grand père et ma grande mère du côté maternel; à la mémoire de mes grands parents du côté paternel.

A toute la grande famille HASSANI et toute la famille ZEMMAMOUCHE chacun par son nom.

AICHA

*A ma mère
A la mémoire de père
A ma sœur Narimane
A tous mes amis et à tous ceux que j'aime*

YASMINE

Résumé

Ce travail porte sur l'étude du phénomène de stabilité statique des réseaux électriques utilisant les méthodes de l'automatique classique (fonction de transfert et valeurs propres), cette étude est basée sur la modélisation du réseau et ses composants ainsi que sur les équations de mouvement.

Un programme de calcul a été élaboré sous environnement MATLAB. Il permet l'évaluation de la stabilité statique des réseaux électriques multimachines ou un générateur. Il a été testé sur les réseaux IEEE 14 nœuds et IEEE 5 nœuds, il donne des résultats prometteurs en termes de précision et de rapidité.

Mots clés : Stabilité statique; modélisation de la machine synchrone, réseaux électriques, types de stabilité.

Abstract

This work concerns the study of the small perturbation stability phenomena with automatic methods as times domain function and eigenvalues; this study is based on the modeling of the network and its components and also its swing equations. Software is elaborated in MATLAB environment. It allows the evaluation of small perturbation stability in electrical network multimachine system or machine. The elaborated software is tested on an IEEE 14-bus and IEEE 5-bus systems, it gives promising results in term of accuracy and speed.

Keywords : steady state; small perturbation stability; modeling of synchronous machine; electrical power system; classification of stability.

المخلص

في هذا العمل قمنا بدراسة الاستقرار الساكن للشبكات الكهربائية وذلك باستعمال الطرق الأوتوماتيكية (دالة تحويل و القيم الذاتية) هذه الدراسة تشمل نمذجة الشبكة الكهربائية و مكوناته مع ذكر معادلاته الحركية .

برمجنا بالاستعانة ب MATLAB.

هذا البرنامج يسمح لنا بتقويم الاستقرار الساكن في الشبكات الكهربائية سواء كانت عبارة عن شبكة متعددة الماكينات أو عبارة عن محول مربوط مع شبكة لانهائية.

انه أداة قوية في حساب الاستقرار فهو يسمح لمسير الشبكة بسير اقتصادي وفعال. اختبر البرنامج على شبكتين إحداهما مكونة من 14 عقدة والأخرى من 5 عقد فأعطى نتائج واعدة من حيث الدقة والسرعة.

الكلمات المفتاحية : الاستقرار الساكن , نموذج الماكينة المتزامنة , الشبكات الكهربائية , أنواع الاستقرار .

Nomenclature et abréviations

a, b, c	Enroulements du stator
A	Matrice d'état
AVR	Automatic Voltage Regulator
b	Susceptance
B	Matrice de commande
C	Matrice de sortie
D	Coefficient d'amortissement
E_{ex}	Tension d'excitation
E_d, E_q	f.e.m transitoire d'axe direct et d'axe en quadrature
E'	fem de la machine synchrone
ξ	facteur d'amortissement
F	enroulement d'excitation de la machine synchrone parcouru par un courant continu
ϕ_{sa}	
ϕ_{sb}, ϕ_{sc}	flux totaux embrassés respectivement par les phases a, b, c
g	conductance
H	constante d'inertie du groupe turboalternateur
I_{abc}	vecteur des courants qui parcourent les phases a, b, c respectivement
I_{odq}	vecteur des courants dans la base odq
J	moment d'inertie de la turbine et du rotor de l'alternateur
L_{ii}	inductances propres pour $i=j$
L_{ij}	inductances mutuelles pour $i \neq j$
M	Moment d'inertie du groupe turboalternateur
MS	Machine synchrone
ω	Vitesse rotorique
ω_0	Vitesse rotorique de référence
ω_d	pulsation d'oscillation amortie
ω_m	vitesse mécanique
ω_n	pulsation d'oscillation naturelle
P	nombre de paire de pôle
P_a	Puissance d'accélération
P_m	Puissance mécanique développée par la turbine
P_e	Puissance électrique développée par le générateur
pu	per unit
P_d	puissance d'amortissement
P_s	coefficient de synchronisme de la puissance
Q	puissance réactive
r	résistance
S	puissance apparente
T_d	Couple d'amortissement
T_m	Couple mécanique de la turbine
δ	Angle rotorique électrique
δ_{in}	Angle rotorique par rapport à la référence machine
δ_m	Angle rotorique mécanique

θ_m	angle de déplacement du rotor par rapport à l'axe du stator
TG	Transformateur du groupe
τ	constante de temps
t_s	temps de réponse
U	vecteur de commande
V	Module de la tension aux bornes du générateur
W_k	énergie cinétique à la vitesse du synchronisme
X	vecteur d'état
x	réactance
X_l	Réactance de la ligne
X_t	Réactance du transformateur
X_d	Réactances synchrones directe
X'_d	Réactances transitoires directe
Y	vecteur de sortie
y	admittance linéique
Y_{ij}	Matrice admittance
z	impédance linéique
z_c	Impédance caractéristique

Table des figures

1.1	Schéma de principe d'un réseau électrique	4
1.2	Courbe de charge	6
1.3	Classification de la stabilité des systèmes électriques	7
2.1	Types de rotors de la machine synchrone	12
2.2	Machine synchrone triphasée	13
2.3	Enroulements de la machine synchrone	13
2.4	Modèle simplifié de la machine synchrone	17
2.5	Courbe de la puissance électrique en fonction de l'angle interne	18
2.7	Modèle linéique complet d'une ligne triphasée	20
2.6	modèle en π de la ligne électrique	20
2.8	Câble souterrain	21
2.9	modèle du transformateur	22
3.1	courbe des puissances en fonction de l'angle interne	28
3.2	Régulateur de tension	34
4.1	Machine reliée à un réseau infini	36
4.2	Variation de l'angle interne et de la fréquence sur 3s	37
4.3	Variation de l'angle interne et de la fréquence sur 30s	38
4.4	Résultat de la simulation en utilisant le modèle d'état sur 3s	38
4.5	Résultat de la simulation en utilisant le modèle d'état sur 30s	39
4.6	Variation de l'angle interne a un échelon de puissance	39
4.7	le schéma bloc du le schéma bloc du système générateur relié à un réseau infini	40
4.8	Courbe de l'angle interne en fonction du temps résultante du schéma bloc	40
4.9	Courbe de la fréquence en fonction du temps résultante du schéma bloc	41
4.10	Représentation des valeurs propres dans le plan complexe pour $D=0$	42
4.11	Représentation des valeurs propres dans le plan complexe en tenant compte de l'amortissement	43
4.12	Représentation des valeurs propres de la matrice d'état dans le plan complexe en présence des régulateurs de tension	45
4.13	Variation de l'angle interne de la machine 1 dans le temps	46
4.14	Variation de l'angle interne de la machine 2 dans le temps	46
4.15	Variation de l'angle interne de la machine 3 dans le temps	46
1	Réseau IEEE 5	51
2	Interface de PSAT	53
3	Calcul d'écoulements de puissances sous PSAT	54
4	Bibliothèque PSAT	54

Liste des tableaux

4.1	Résultats d'écoulements de puissance pour $D=0$	41
4.2	Valeurs propres de la matrice d'état	42
4.3	Résultats d'écoulements de puissance en tenant compte de l'amortissement	43
4.4	Valeurs propres de la matrice d'état en tenant compte de l'amortissement	43
4.5	Résultats d'écoulements de puissances en présence des régulateurs de tension	44
4.6	Valeurs propres de la matrice d'état en présence des régulateurs de tension	44
1	Données des nœuds du réseau IEEE5 nœuds	51
2	Données des lignes du réseau IEEE 5 nœuds	52

Table des matières

Table des figures	14
Liste des tableaux	15
Table des matières	16
1 Généralités sur le réseau électrique et la stabilité	3
1.1 Introduction	3
1.2 Le système électrique	3
1.3 Production de l'énergie électrique	5
1.4 Transport de l'énergie électrique	5
1.5 Demande et distribution de l'énergie électrique	5
1.6 La stabilité du réseau électrique	7
1.7 Classification selon le paramètre du système affecté	8
1.8 Classification selon le type de perturbation	9
1.9 Conclusion	10
2 Modélisation du réseau électrique pour les études de stabilité	11
2.1 Introduction	11
2.2 principe de fonctionnement de la machine synchrone	11
2.3 Transformation de PARK	12
2.4 Modèle d'état de la machine synchrone	16
2.5 Modèles simplifiés de la machine synchrone	16
2.6 Modèle linéaire de la machine synchrone	18
2.7 Modèle des lignes	19
2.8 Modèle des câbles	21
2.9 Modèle du transformateur	21
2.10 Conclusion	22
3 Stabilité statique	25
3.1 Introduction	25
3.2 L'équation du mouvement	25
3.3 Linéarisation de l'équation	27
3.4 Réponse du système aux petites perturbations de puissance	30
3.5 Résolution de l'équation du mouvement par des méthodes numériques	32
3.6 Modes d'oscillations d'un réseau multimachines non régulé	32
3.7 Effet des régulateurs sur la stabilité statique	33
3.8 Conclusion	34
4 Méthodes de calcul et applications	35

4.1	Introduction	35
4.2	Méthode analytique	35
4.3	Simulation numérique	35
4.4	Générateur relié à un réseau infini	36
4.5	Réseau multimachines	41

Introduction générale

Les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une grande importance, notamment après des black-out paralysant des villes entières à cause d'une consommation d'électricité qui augmente sans cesse.

Pour cela les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés, formant ainsi des systèmes larges et complexes capables de générer, de transmettre et de distribuer l'énergie électrique à travers de vastes étendues. Ces réseaux électriques sont assujettis à diverses perturbations qui engendrent différents phénomènes conduisant à des dysfonctionnements dont la gravité peut parfois se traduire par un effondrement partiel ou total des ces réseaux.

Parmi les problèmes qui peuvent surgir suite aux perturbations, il y a celui de la stabilité des réseaux qui concerne le comportement de la machine synchrone suite à une perturbation. Ce phénomène se produit lorsqu' un déséquilibre entre la production et la consommation est créé par une variation de la charge, de la production ou du réseau de transport. Suite à ce déséquilibre il est nécessaire d'avoir un nouveau point de fonctionnement. La réponse du système à la perturbation est fortement liée à la robustesse même du réseau.

Si le réseau est suffisamment robuste alors le système reste stable, toutes les machines synchrones connectées au réseau maintiennent le synchronisme ce qui veut dire que toutes les machines tournent à la même fréquence et les oscillations seront amorties ramenant le système au nouveau point de fonctionnement.

La tension, la fréquence et l'angle interne sont les trois principaux facteurs déterminant la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs, et indispensable pour la qualité de service, ils doivent être maintenues dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement du réseau. L'analyse de la stabilité consiste à évaluer la capacité du système à supporter des éventuelles perturbations, et de proposer par la suite les moyens de réglage adéquats permettant d'améliorer cette capacité et le maintien de ces trois grandeurs. [2]

Les générateurs interconnectés produisent les couples qui dépendent du déplacement relatif des angles de leurs rotors, et ces couples agissent pour maintenir les générateurs dans le synchronisme. Si la perturbation est petite, les couples de synchronisme maintiennent les générateurs nominalement dans le synchronisme, mais les angles relatifs des générateurs restent perturbés. D'autre part, Si la perturbation est grande, la nature non linéaire du couple de synchronisme peut ne pas mettre les angles de générateur à un état d'équilibre. Certains ou tous les générateurs perdent alors le synchronisme et le système deviennent instables. [3]

Les oscillations électromécaniques peuvent apparaître d'abord quand le réseau est contraint à alimenter des charges variables sans cesse croissantes. De ce fait, les générateurs doivent s'ap-

puyer plus fortement sur leurs systèmes d'excitation pour maintenir le synchronisme. A défaut, et à un certain point, sans commande supplémentaire, les oscillations deviennent instables.

Dans le présent travail, nous nous intéressons particulièrement à l'étude du phénomène de la stabilité statique des réseaux électriques. Le premier chapitre traite des concepts et notions de base indispensables à toute étude de stabilité il est donc consacré aux notions générales sur les systèmes électriques et leurs différentes parties : la demande, production, transport, gestion et distribution de l'énergie électrique. Les définitions et présentations des divers phénomènes de stabilité et plus particulièrement les différences élémentaires entre ces types de stabilité y sont également données.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation des réseaux électriques et de leurs composants, un résumé du principe de fonctionnement de la machine synchrone est donné en premier lieu suivi d'un aperçu sur transformation de Park pour ce genre de machines et son modèle mathématique. Il est achevé par la présentation des modèles des composants restants du réseau. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse de la stabilité. Il traite plus particulièrement de la méthodologie d'étude.

Le quatrième chapitre englobe la méthodologie de la simulation, des hypothèses proposées pour l'étude de la stabilité du réseau électrique, il présente également des applications numériques simulées au moyen du programme de calcul que nous avons élaboré dans l'environnement « Matlab ».

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale présentant les principaux résultats obtenus que les perspectives de développement pour des travaux ultérieurs.

Chapitre 1

Généralités sur le réseau électrique et la stabilité

1.1 Introduction

Le réseau électrique joue un rôle économique très important car le développement technologique de l'industrie qui dépend hautement d'un approvisionnement sécurisé, fiable et économique de l'énergie électrique. Aussi la production, le transport et l'utilisation d'énergie électrique restent les domaines d'études les plus importants dans le génie électrique.

Mais la gestion d'un tel système est rendue difficile pour plusieurs raisons, parmi lesquelles il y a les contraintes environnementales, la rareté des sources primaires d'énergie et la croissance rapide de la demande.

1.2 Le système électrique

On appelle communément « système électrique » l'ensemble des installations électriquement interconnectées qui assurent la livraison à tous les utilisateurs d'électricité. Les kilowattheures produits à partir de sources d'énergie primaires telles que l'hydraulique, les combustibles fossiles, la fission nucléaire, l'énergie éolienne, voire, mais encore marginalement, l'énergie solaire directe.

Dans un système électrique, on distingue traditionnellement trois étages aux fonctions différentes s'articulant entre elles (figure 1).

- Le premier étage est celui de la production de l'électricité qui sera livrée aux consommateurs. Il est constitué par les usines, souvent appelées « centrales », qui convertissent en kilowattheures les énergies primaires, véritables sources de l'énergie consommée par les utilisateurs d'électricité.
- Le deuxième étage est celui du réseau de transport et d'interconnexion auquel sont raccordées les usines de production. Cet étage assure la mise en commun et la répartition sur un très vaste territoire de toute l'électricité qui y est produite. Le réseau de transport et d'interconnexion est le véritable nœud du système électrique. Il peut être à l'échelle d'un continent tel que l'Europe ; dans le cas européen, il a même commencé à s'étendre vers l'Afrique du Nord via le détroit de Gibraltar.
- Le troisième étage est celui des réseaux de distribution. En effet, un réseau de transport et d'interconnexion peut desservir directement certains très gros utilisateurs d'électricité. Mais des réseaux intermédiaires sont nécessaires pour desservir les millions et dizaines

de millions de consommateurs, industriels ou domestiques, qui ont besoin de puissances se chiffrant en kilowatts et mégawatts, et non en dizaines ou centaines de mégawatts. De nombreux réseaux de distribution, alimentés chacun séparément par le réseau de transport, assurent le convoyage de la puissance électrique et son émiettement vers la multitude de ses utilisateurs[5]

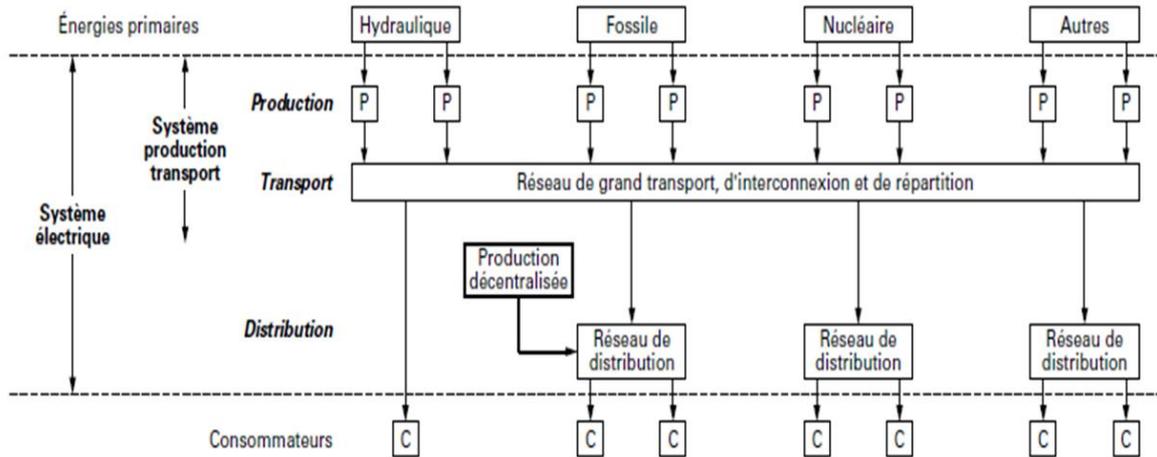


FIGURE 1.1: Schéma de principe d'un réseau électrique

Un système électrique (production, transport et distribution) est donc une immense usine qui utilise des énergies primaires et les transforme de façon telle qu'elle les met instantanément, et sous une forme particulièrement commode, à la disposition d'utilisateurs qui seraient bien en mal d'en bénéficier autrement. Une telle usine a besoin d'être bien gérée ; en gros, il s'agit ici du choix à chaque instant des énergies primaires et des modes de conversion les plus économiques. Par contre, les étages production et transport forment un ensemble économiquement et techniquement très intégré. Par exemple, il est indispensable de respecter à tout moment les trois principaux types de contraintes techniques.

- équilibre production-consommation ;
- sécurité individuelle des ouvrages ;
- sécurité globale du système pour faire face aux aléas. Le dysfonctionnement d'un élément quelconque de cet ensemble est susceptible, si on n'y prend pas garde, d'affecter tout le réseau et tous ses clients. Il faut et bien conduite, c'est-à-dire contrôlée de façon à assurer la sécurité du processus de conversion et de transmission, gage de la qualité du service à ses clients. Les dimensions de « l'usine », la diversité de ses exploitants en font un difficile problème d'organisation et de technique.
- Les liens des réseaux de distribution avec le réseau de transport qui alimente chacun d'entre eux peuvent être caractérisés par quelques paramètres simples. La gestion de ces réseaux peut donc être individualisée et assez facilement découplée de celle du réseau de transport et d'interconnexion. Il faut donc coordonner, à l'échelle d'un continent, la gestion et la conduite du système production transport d'électricité qui le couvre. Tel est le cœur du rôle technique des gestionnaires du système production-transport

1.3 Production de l'énergie électrique

La production d'électricité est essentiellement un secteur industriel, destiné à mettre à disposition de l'ensemble des consommateurs la possibilité d'un approvisionnement adapté à leurs besoins en énergie électrique. La production d'électricité se fait depuis la fin du XIXe siècle à partir de différentes sources d'énergie primaires. La production se fait à partir de l'énergie fossile (charbon, gaz naturel et pétrole), de l'énergie nucléaire, de l'énergie hydraulique, de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne et de l'énergie de la biomasse. Les moyens mis en œuvre sont diversifiés, et dépendent de plusieurs facteurs :

- Les techniques disponibles ;
- La réactivité de mise en œuvre ;
- La production nécessaire ;
- Le rendement possible ;
- Les coûts d'investissement, d'exploitation et de déconstruction ;
- Le coût des éventuelles matières premières ;
- Les impacts écologiques occasionnés .

1.4 Transport de l'énergie électrique

L'avantage de l'énergie électrique est que celle produite peut être transmise sur de longues distances jusqu'à arriver aux centres de consommation ; mais dans la mesure où le transport de l'énergie électrique s'accompagne de pertes non négligeables sur les longues distances, il serait préférable de construire les centrales électriques à proximité des foyers de consommation.

L'énergie perdue dans une ligne de transmission est proportionnelle au carré du courant, les lignes de transmission fonctionnant à des tensions élevées ou très élevées. Le réseau électrique relie toutes les stations d'alimentation dans un système, et transporte et distribue la puissance à la charge des centres de manière optimale. Habituellement, le réseau de transmission a une structure maillée afin de fournir de nombreuses voies possibles pour l'énergie électrique à partir de générateurs de flux individuels pour consommateurs individuels améliorant ainsi la flexibilité et la fiabilité du système.[6]

On ne peut trop insister sur l'importance de la transmission de puissance pour l'intégrité globale du système.

Le réseau de transport rend le système d'alimentation hautement interactive, dans lequel l'action de n'importe quel composant individuel (une centrale électrique ou une charge) influe sur les autres composants du système. C'est la raison principale pour laquelle la transmission reste une entreprise monopolistique, même dans la structure du marché libéralisé, et il est géré par un opérateur de système unique. Le gestionnaire du réseau est responsable du maintien et de la sécurité du système électrique et pour optimiser la puissance du système d'exploitation.

Comme l'énergie électrique se rapproche du centre de distribution, elle est dirigée à partir du réseau de transmission dans un réseau de répartition. Il n'y a pas de stricte division du réseau de transmission et de celui de répartition.[7]

1.5 Demande et distribution de l'énergie électrique

La plupart de l'énergie électrique est transférée du réseau de transmission aux réseaux de distribution haute tension (pour les clients haute tensions) et moyenne tension, a fin de l'amener directement aux consommateurs.

Le réseau de distribution est généralement relié à une structure radiale, par opposition à la structure maillée utilisés dans le système de transmission. Les gros consommateurs peuvent être alimentés par un faible réseau de distribution couplée, ils peuvent être alimentés par deux départs radiaux avec une possibilité de commutation automatique entre les départs en cas de coupure de courant.

Certains consommateurs industriels peuvent avoir leur propre génération sur le site comme réserve ou comme sous-produit d'un processus technologique (production de vapeur par exemple). [6] En fin de compte la tension est transformée en une tension basse et distribuée directement aux consommateurs.

Le distributeur se doit de fournir le service de transport de l'électricité sur les réseaux de distribution au meilleur niveau de qualité et au meilleur coût dans les conditions de sécurité optimales. En effet, ce sont les réseaux de distribution qui sont à l'origine d'une part essentielle de la qualité effectivement reçue par l'utilisateur aux bornes de son alimentation. En outre, la part MT et BT des réseaux représente une partie importante du coût total des infrastructures nécessaires à la desserte d'un client. [7]

Le réseau de distribution est développée selon l'évolution de la charge, il est à noter que la demande d'électricité n'est jamais constante, elle représente des changements en continu toute la journée et la nuit comme le montre la courbe de charge journalière suivante.

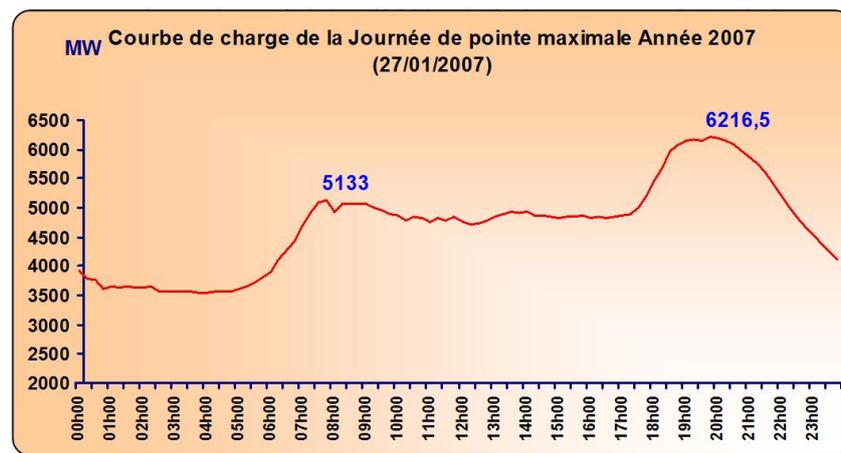


FIGURE 1.2: Courbe de charge

L'évolution de la demande des consommateurs individuels peut être rapide et fréquente, elle devient plus petite et plus lisse que les demandes individuelles sont agrégées. En conséquence, la demande totale en électricité et ses changements de niveau d'une manière devient plus ou moins prévisibles et dépend de la saison, les conditions météorologiques, ainsi que le niveau de vie d'une société donnée et ainsi de suite. Les changements rapides globaux de la demande d'électricité sur le niveau de la production sont généralement de petite taille et sont générés par les fluctuations des charges.

Comme on le sait l'électricité n'est pas stockable, alors sa production doit être égale à la quantité d'énergie consommées plus les pertes au cours de sa transmission, pour cela des études de load flow et load flow optimale doivent être faites.

Enfin, les préoccupations d'environnement constituent aujourd'hui un enjeu croissant : le sys-

tème électrique de distribution, au-delà de son efficacité, doit être discret, ne pas générer de déchets polluants et, de façon générale, préserver le cadre de vie. [5]

1.6 La stabilité du réseau électrique

La stabilité est définie comme l'habilité d'un système à retrouver son point de fonctionnement (ou point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations. Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées.

L'étude de la stabilité des systèmes électriques s'avère souvent très compliquée à cause de l'interaction des phénomènes de différentes natures. De plus, un défaut qui surgit dans un réseau électrique est toujours le résultat d'une superposition de causes. D'où la nécessité pour une étude plus facile pour mettre en relief le type d'instabilité et les différents phénomènes qui y conduisent. Dans ce chapitre nous allons présenter des notions sur la stabilité des réseaux et ses différents types en nous intéressant à la stabilité en tension.

Les problèmes de stabilité dans les systèmes électriques ont depuis longtemps reçu une très grande attention. En effet, un système électrique en fonctionnement peut subir une grande variété de perturbations ou d'incidents, [10] tels que :

- La variation de la charge au cours de la journée.
- La manœuvre d'un ouvrage de couplage.
- Le déclenchement d'une unité de production ou d'une charge.
- La foudre atteignant une ligne.
- Un court-circuit en réseau.

Ces phénomènes dynamiques mettent en jeu des constantes de temps très différentes allant de la microseconde à l'heure. Cette caractéristique est d'une grande aide et permet de classer la stabilité des systèmes électriques en plusieurs catégories.

La stabilité est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées. Nous distinguons trois types de stabilité :

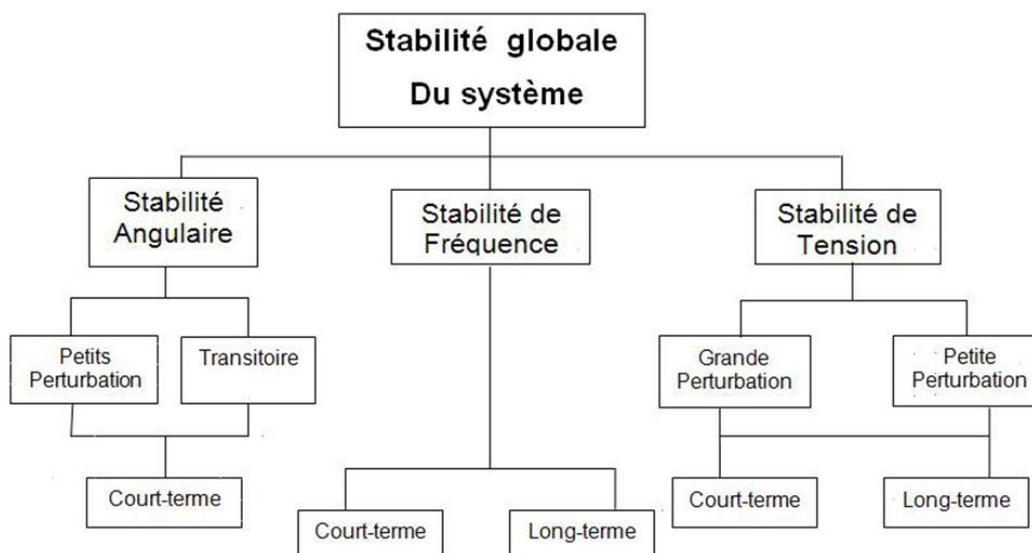


FIGURE 1.3: Classification de la stabilité des systèmes électriques

La "limite de stabilité" est la puissance maximale transmissible possible sur le réseau, lorsque le système dans son ensemble ou une partie du système électrique auquel la limite de stabilité fait référence, est en état stable. [12]

Le système électrique est fortement non linéaire et fonctionne dans un environnement constamment en cours d'évolution ; les charges, les sorties de générateur et les différents paramètres changent continuellement. Une fois soumis à une perturbation provisoire, la stabilité du système dépend de la nature de la perturbation aussi bien que des conditions de fonctionnement initiales. La perturbation peut être petite ou grande. Les petites perturbations dues aux changements de charge se produisent continuellement, et le système s'ajuste selon les conditions de changement. Le système doit être capable de fonctionner et de satisfaire la demande de charge. Il doit également pouvoir survivre après de nombreuses perturbations d'une nature grave, tels qu'un court-circuit sur une ligne de transport ou perte d'un grand groupe de production.

Après une perturbation passagère, si le système électrique est stable, il atteindra un nouvel état d'équilibre et il reste presque entièrement intact ; les actions des contrôles automatiques et probablement des opérations humaines permettent par la suite au système de revenir à l'état normal.

Si le système est instable, il aura comme conséquence un emballement ou il se retrouve dans un état de fonctionnement précaire où par exemple, une augmentation graduelle de séparation angulaire des rotors des générateurs, ou une diminution graduelle des tensions des jeux de barre le conduit à un état de fonctionnement complètement dégradé.

Une condition de fonctionnement instable du système peut conduire à des déclenchements en cascade des lignes et des générateurs et à un arrêt d'une partie importante du système électrique.

1.7 Classification selon le paramètre du système affecté

Pour mieux comprendre les mécanismes du phénomène d'instabilité dans les systèmes électriques et concevoir des outils de prévention appropriés, la stabilité du système est classée dans trois différentes catégories : stabilité d'angle de rotor dite aussi stabilité angulaire, stabilité de fréquence et stabilité de tension.

Stabilité angulaire

La stabilité angulaire est définie comme la capacité des générateurs synchrones d'un réseau à maintenir le synchronisme après avoir été soumis à une ou plusieurs perturbations. L'instabilité se traduit par des oscillations angulaires de certains générateurs conduisant à la perte de leurs synchronismes avec les autres générateurs. La stabilité angulaire est classifiée dans deux catégories : la stabilité des angles de rotor aux petites perturbations et la stabilité des angles de rotor aux grandes perturbations.

stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence est la capacité d'un système électrique à maintenir une fréquence régulière dans une marge nominale suite à une contrainte grave ayant pour résultat un déséquilibre significatif entre la production et la charge. Elle dépend de la capacité à reconstituer l'équilibre entre la production et la charge, avec une perte minimale de charge.

stabilité de tension

La stabilité de tension est la capacité du réseau de maintenir la tension à tous les nœuds du réseau après avoir été soumis à une perturbation à partir d'une condition de fonctionnement

initiale donnée.

La stabilité de tension peut être encore divisée en sous-problèmes : stabilité transitoire de tension et stabilité de tension aux petites perturbations.

Le délai pour le problème de l'instabilité de tension peut varier de quelques secondes à des dizaines de minutes. Par conséquent, la stabilité de tension peut être un phénomène à court terme ou à long terme.

L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification des conditions du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable, aboutissant à un effondrement de la tension.

1.8 Classification selon le type de perturbation

L'étude de la stabilité est généralement effectuée pour les deux régimes de fonctionnement distincts :

Stabilité statique

Le réseau a un comportement stable ; cela signifie que lorsqu'il est soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

Cette stabilité statique se rapporte à la capacité du système d'alimentation en énergie électrique à retrouver le synchronisme après de petites et lentes perturbations, telles que les changements progressifs de puissance.

Une extension de la stabilité statique est connue sous le nom de stabilité dynamique ou bien sous le nom de stabilité en petit mouvement.

On dit qu'un système électrique est stable en petit mouvement (ou en régime statique) s'il revient au point de fonctionnement initial après avoir été soumis à une petite perturbation (régime linéaire).

La stabilité statique est donc une condition nécessaire de fonctionnement. Par extension, l'étude de la stabilité statique vise aussi à améliorer les conditions d'amortissement des oscillations induites par les petites perturbations.

Un système qui est stable dans les toutes premières secondes suivant une grande perturbation, n'est pas forcément sûr d'être stable suite à de faibles perturbations. Donc on s'intéresse à la stabilité en petit mouvement au même titre que la stabilité transitoire.

Contrairement à la stabilité transitoire, qui nécessite un modèle non linéaire du système électrique, la stabilité en petit mouvement s'étudie sur un modèle préalablement linéarisé autour d'un point de fonctionnement. Ainsi, nous pouvons analyser la stabilité en petit mouvement en utilisant les méthodes d'analyse des systèmes linéaires. En se basant sur l'identification des valeurs propres du système.

Un moyen efficace et économique d'améliorer la stabilité en petit mouvement d'un système électrique est d'équiper de régulateurs de tension, de générateurs, et de dispositifs de stabilisation appelés stabilisateurs de puissance

Ces stabilisateurs, avec un choix adéquat de leurs paramètres, aident à amortir les oscillations induites par les petites perturbations, ainsi qu'à améliorer la stabilité de l'ensemble du système. [13]

Stabilité transitoire

Cette stabilité concerne le comportement des systèmes électriques sous les effets de grandes perturbations qui surviennent soudainement telles :

- L'occurrence soudaine d'un défaut,
- La perte soudaine d'un gros groupe de production ou d'une ligne importante d'interconnexion
- La perte ou le déplacement soudain de grosses charges.

Les études de stabilité transitoires sont nécessaires pour s'assurer que le système peut résister à l'état transitoire dans lequel il se retrouve suite à une perturbation importante[14]

Les études de stabilité transitoire permettent de déterminer si le synchronisme est maintenu après que la machine n'ait été soumise à des perturbations graves. Pour la plupart des perturbations, les oscillations sont d'une telle grandeur que la linéarisation du système n'est pas possible et l'équation non linéaire d'oscillation doit être résolue pour pouvoir faire les analyses. Une méthode connue sous le nom de critère d'égalité des aires peut être employée pour une estimation rapide de stabilité. Cette méthode est basée sur l'interprétation graphique des énergies stockées dans la masse tournante afin de pouvoir déterminer si la machine maintient sa stabilité après une perturbation. La méthode s'applique seulement à un système constituée d'une seule machine reliée à un nœud infini ; puisqu'il fournit la perspicacité physique au comportement dynamique de la machine.[7]

1.9 Conclusion

L'énergie électrique est produite, transmise et distribuée suivant la demande des consommateurs, la production augmente avec l'augmentation de la demande et vis versa. Les réseaux de distribution et de transport subissent eux aussi des changements liées à la demande des clients ceci est la cause des études de prévisions de la demande et de son développement ; ceci engendre différents problèmes de stabilité, celle-ci englobe plusieurs types et étudier selon différents critères.

Chapitre 2

Modélisation du réseau électrique pour les études de stabilité

2.1 Introduction

La première étape dans l'analyse d'un système électrique est de trouver un modèle mathématique adéquat. Généralement, un modèle, dans l'analyse des systèmes, est un ensemble d'équations ou de relations, qui décrit convenablement les interactions entre les différentes variables étudiées, dans la gamme de temps considérée et avec la précision désirée, pour un élément ou un système. Par conséquent selon le but de l'analyse, un élément ou un même système physique, peut donner lieu à des modèles différents[8].

Dans de nombreux cas, le choix du modèle correct est souvent la partie la plus difficile de l'étude. Le point essentiel étant de trouver le modèle qui réalise un compromis entre la fidélité du comportement qualitatif et quantitatif et la simplicité de mise en œuvre à des fins d'analyse et de synthèse. Les modèles complexes ont généralement besoin d'un nombre plus important de paramètres. En outre, l'obtention de valeurs fiables pour ces paramètres exige un travail important. Enfin si des méthodes trop complexes sont utilisées, l'analyse et les calculs sont inutilement volumineux et l'interprétation du résultat exige également un travail très important.

Généralement, pour établir un modèle de réseau électrique pour les études de stabilité, on tient compte uniquement des équipements en activité pendant la plage temporelle du phénomène dynamique considéré. Le résultat est donc le modèle de connaissance complet du système : il se compose d'équations différentielles ordinaires non-linéaires et d'équations algébriques.

Dans ce chapitre nous allons présenter le modèle de la machine synchrone ainsi que le modèle des lignes, des câbles et des transformateurs.

2.2 principe de fonctionnement de la machine synchrone

La machine synchrone est le siège de phénomènes électriques et de phénomènes mécaniques qui doivent être décrits et modélisés. La machine synchrone est constituée essentiellement d'un stator, d'un rotor et d'enroulements amortisseurs. Le stator est formé par un enroulement triphasé qui constitue l'induit de la machine, ce bobinage est le siège des forces électromotrices induites par le champ tournant.

Le rotor porte un enroulement d'excitation alimenté par un courant continu pour produire un flux tournant proportionnel au courant d'excitation. Ce flux crée par induction une force

électromotrice sur chaque phase du stator.

Le rotor peut être à pôles lisses ou à pôles saillants : Les rotors à pôles saillants sont bien adaptés aux machines à nombre de paires de pôles élevé et à vitesse de rotation basse ou moyenne qu'on trouve dans les centrales hydrauliques par exemple. Les rotors à pôles lisses sont quand à eux mieux adaptés aux machines à faible nombre de paires de pôles et à vitesse élevée, on les trouve dans les turboalternateurs des centrales thermiques[19].

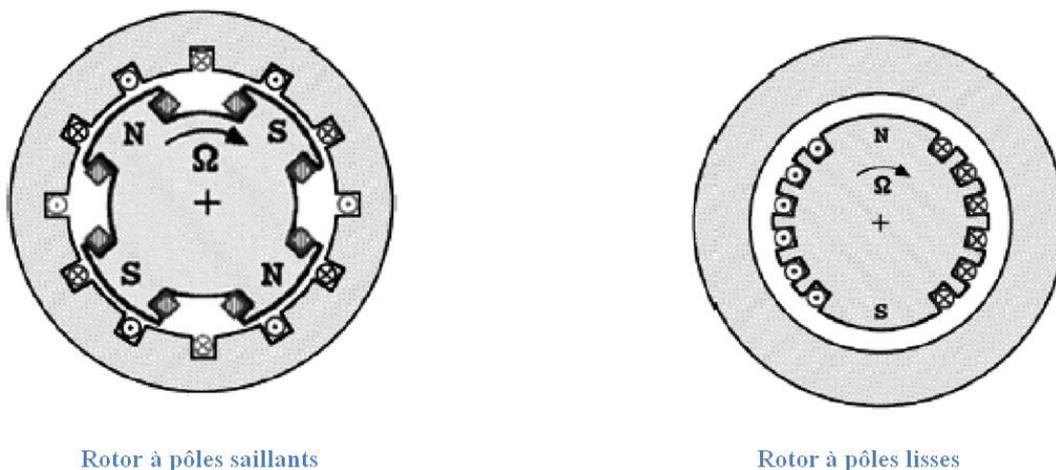


FIGURE 2.1: Types de rotors de la machine synchrone

Les machines à rotor bobiné sont souvent munies d'amortisseurs. Ce sont des barres de cuivre placés dans des encoches à la périphérie des pôles et reliées entre elles pour former une cage analogue à celle du moteur asynchrone. Dans les machines à rotor massif, l'effet d'amortissement est obtenu par la circulation du courant dans le rotor massif. Les amortisseurs s'opposent aux oscillations consécutives aux changements brusques de fonctionnement. Ils jouent de ce fait un rôle très important dans le maintien de la stabilité de la machine.

2.3 Transformation de PARK

La transformation de R.H.PARK simplifie les équations de la machine synchrone, elle est obtenue à partir de la projection des variables triphasées sur trois nouveaux axes : le premier suivant la direction du flux généré par le courant traversant les enroulements du rotor appelé l'axe directe d . Le second axe est perpendiculaire au premier appelé l'axe en quadrature q . Le dernier est l'axe homopolaire, les projections sur cet axe sont nulles car la machine est supposée symétrique et le réseau équilibré.[15]

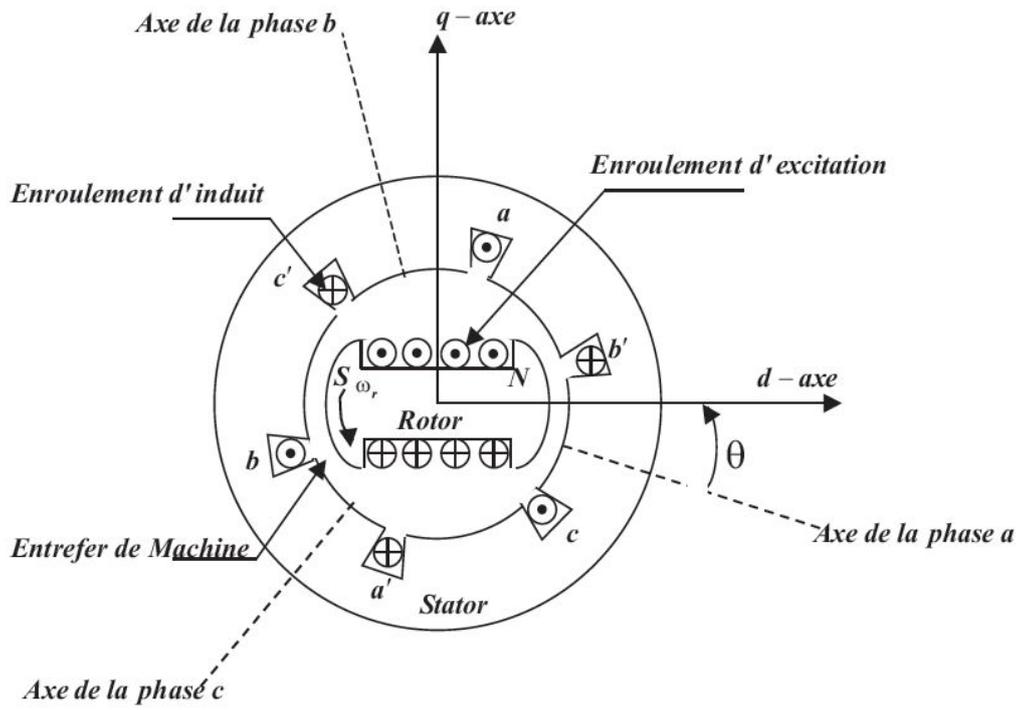


FIGURE 2.2: Machine synchrone triphasée

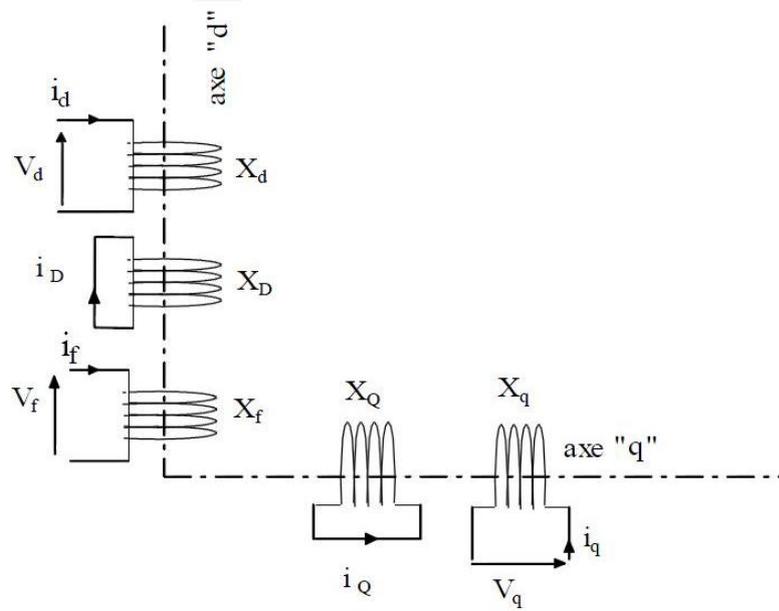


FIGURE 2.3: Enroulements de la machine synchrone

La transformation de PARK est donnée par la matrice P tel que $i_{odq} = i_{abc}$ avec :

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

La machine synchrone a trois enroulements (a, b, c) au stator, un enroulement f parcouru par un courant continu au rotor et deux enroulements amortisseurs D et Q qui sont court circuités.[15] Ces différents enroulements sont couplés magnétiquement entre eux, la tension aux bornes de chaque enroulement est donc de la forme :

$$v = \pm ri \pm \frac{d\phi}{dt}$$

Les équations des flux sont données sous forme matricielle par :

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ - \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & | & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & | & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & | & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ - & - & - & | & - & - & - \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & | & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & | & L_{Df} & L_{Dkd} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & | & L_{Qf} & L_{QD} & L_{Qkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ - \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

où les L_{ij} sont : Les inductances propres pour $i = j$

Les inductances mutuelles pour $i \neq j$

les inductions propres du stator sont de la forme

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

Les inductances propres du rotor sont de la forme :

$$L_{ff} = L_f$$

$$L_{Df} = L_D$$

$$L_{Qf} = L_Q$$

Les inductances mutuelles du stator sont de la forme :

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \frac{\pi}{6})$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \frac{\pi}{6})$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \frac{5\pi}{6})$$

Les inductances mutuelles du rotor sont de la forme :

$$L_{fD} = L_{Df} = M_R$$

$$L_{fQ} = L_{Qf} = 0$$

$$L_{DQ} = L_{QD} = 0$$

Les inductances mutuelles entre le stator et le rotor sont de la forme :

$$L_{af} = L_{fa} = M_f \cos \theta$$

$$L_{bf} = L_{fb} = M_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cf} = L_{fc} = M_f \cos \theta + \frac{2\pi}{3}$$

$$L_{aD} = L_{Da} = M_D \cos \theta$$

$$L_{bD} = L_{Db} = M_D \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = M_D \cos \theta + \frac{2\pi}{3}$$

$$L_{aQ} = L_{Qa} = M_Q \cos \theta$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = M_Q \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = M_Q \cos \theta + \frac{2\pi}{3}$$

On définit :

$$L_d = L_s + M_s + (\frac{3}{2})L_m$$

$$L_q = L_s + M_s - (\frac{3}{2})L_m$$

$$L_0 = L_s - M_s$$

et

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

La matrice des flux se retrouve simplifiée et on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_d \\ \phi_q \\ - \\ \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & | & kM_f & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & | & 0 & 0 & kM_Q \\ - & - & - & | & - & - & - \\ 0 & kM_f & 0 & | & L_f & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & | & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & | & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ - \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

2.4 Modèle d'état de la machine synchrone

Notre objectif est de déterminer modèle d'état de la machine synchrone et de le mettre sous la forme :

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Où : $\dot{x} = f(x, u, t)$

Avec :

x : le vecteur d'état u : le vecteur de commande t : vecteur des fonctions non linéaires Le modèle d'état s'écrit finalement

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ -v_f \\ 0 \\ v - q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r + 3r_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_Q & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_d & -\omega kM_f & -\omega kM_D & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_0 + 3L_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & kM_f & kM_D & 0 & 0 \\ 0 & kM_f & L_f & M_R & 0 & 0 \\ 0 & kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix} V$$

le modèle en tensions n'est pas adapté aux études de stabilité des réseaux électriques notamment pour ses valeurs numériques quand on travaille à l'échelle des kV. Ce problème peut être résolu en passant au système d'unités réduites Le modèle devient alors comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_f \\ 0 \\ v - q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_Q \\ 0 & r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_f & -\omega kM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_f & kM_D & 0 & 0 \\ kM_f & L_f & M_R & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix} pu$$

2.5 Modèles simplifiés de la machine synchrone

Dans le paragraphe précédent , nous avons établi le modèle mathématique de la machine synchrone tient compte de l'effet du circuit du rotor et des circuits amortisseurs. ce qui donne un

système de plusieurs équations différentielles pour chaque machine dans un réseau en plus des équations du système d'excitation et des équations qui décrivent le fonctionnement du réseau et des charges. Par conséquent, le modèle complet d'un large réseau devient très complexe et a besoin donc, d'être simplifié.

Pour les études de stabilité statique, seules les machines qui se trouvent à proximité de la perturbation sont représentées par leur modèle complet. Les autres machines sont représentées par un modèle simplifié. En général les simplifications adoptées dépendent de la nature de la perturbation à étudier et dans le cas de la stabilité statique on pose les hypothèses suivantes :

1. Négliger les résistances de l'inducteur et de l'induit
2. L'amortissement n'est produit que par les enroulements amortisseurs
3. Négliger la réactance de fuite de l'enroulement d'induit
4. L'excitation n'affecte pas le couple d'amortissement.

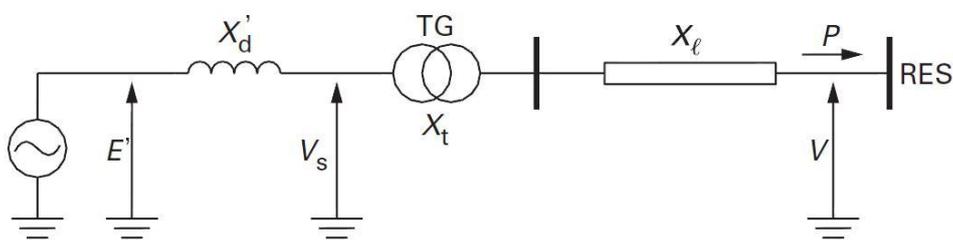


FIGURE 2.4: Modèle simplifié de la machine synchrone

La matrice admittance de ce système est donnée par :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{22}$$

La puissance électrique est donnée par : $P_e = \Re [E' I_1^*]$

$$P_e = |E'| |V| |B_{12}| \cos(\delta - \frac{\pi}{2})$$

Les impédances Z_l et Z_t sont à prédominance inductive c'est à dire que leurs résistances sont négligées donc $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$ et $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$. D'où l'expression simplifiée de la puissance :

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta$$

Ou :

$$P_e = P_{max} \sin \delta$$

Avec :

$$P_{max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}}$$

D'où la courbe *puissance – angle* représentée par la figure suivante :

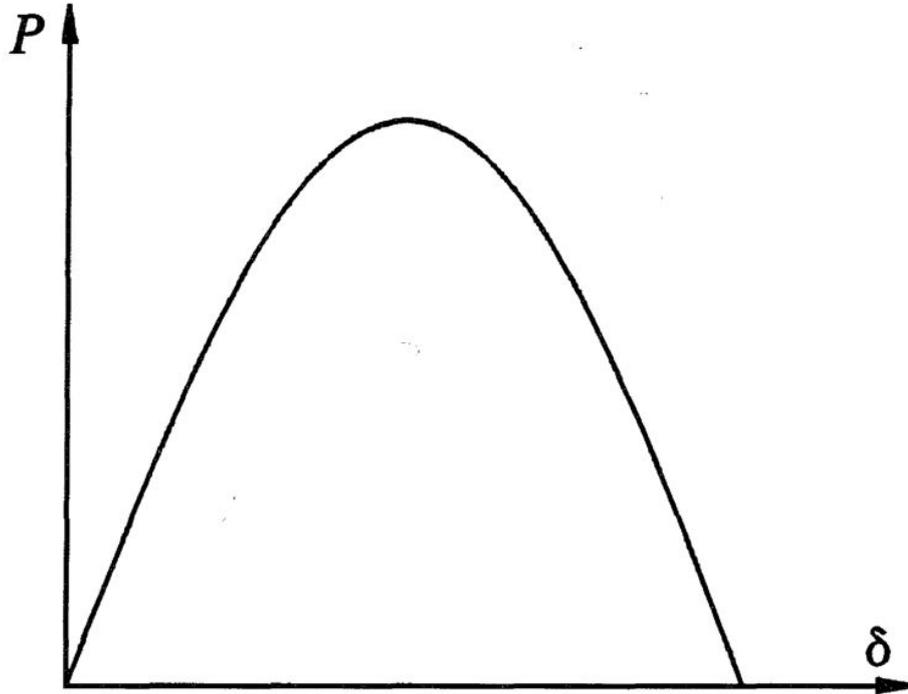


FIGURE 2.5: Courbe de la puissance électrique en fonction de l'angle interne

La courbe *puissance – angle* est fortement non linéaire, en effet, la puissance varie de façon sinusoïdale par rapport à l'angle interne δ . Cependant, en tenant compte de l'effet des régulateurs de tension, la courbe s'éloigne de la sinusoïde tout en gardant la même allure.[20]

2.6 Modèle linéaire de la machine synchrone

Quand système est sujet a de petites perturbations il tend à acquérir un nouveau point de fonctionnement, durant la transition entre l'état initial et le nouveau point de fonctionnement la réponse du système est oscillatoire, cependant, les variables d'état varient légèrement. Dans ces conditions on peut linéariser le système autour de son état initial La réponse d'un système linéaire est déterminée par son équation caractéristique. Dans ce cas la réponse en régime libre et en régime forcé sont déterminées par les racines de l'équation caractéristique. Le vecteur d'état x a un état initial x_0 à $t = t_0$ tel que :

$$x'_0 = [i_{d0} \quad i_{f0} \quad i_{D0} \quad i_{q0} \quad i_{Q0} \quad \omega_0 \quad \delta_0]$$

A noter que x_0 peut ne pas être constant mais il doit être connu à tout moment.

Quand une petite perturbation a lieu, à $t = t_0^+$ l'état du système devient :

$$x = x_0 + x_\Delta$$

Le modèle d'état est de la forme :

$$\dot{x} = f(x, t)$$

donc :

$$\dot{x}_0 \dot{x}_\Delta = f(x_0 + x_\Delta, t)$$

En négligeant les termes du second ordre de la forme : $x_{i\Delta} x_{j\Delta}$ le système devient :

$$\dot{x}_0 \dot{x}_\Delta \cong f(x_0, t) + A(x_0)x_\Delta + B(x_0)u$$

Les valeurs de la matrice A dépendent des valeurs du vecteur initial x_0 qu'on considère comme constant. les propriétés du système dépendent alors de la nature des valeurs propres de la matrice A. Dans un système multivariables A(x_0) peut être déterminée en trouvant sa différentielle totale dx à x_0 avec $dx \cong x_\Delta$

$$\dot{x}_\Delta = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_0} x_{1\Delta} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_0} x_{2\Delta} + \dots + \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{x_0} x_{n\Delta}$$

$$\dot{x}_\Delta = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} \right] x_\Delta = A(x_0)x_\Delta$$

On linéarise de cette manière le vecteur x ligne par ligne. on obtient le modèle linéarisé de la machine synchrone en supprimant l'indice Δ :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_f \\ 0 \\ \dots \\ v_q \\ 0 \\ \dots \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & | & \omega_0 L_q & \omega_0 kM_Q & | & \phi_{q0} & 0 \\ 0 & r_f & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & | & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & | & \dots & \dots \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_f & -\omega_0 kM_D & | & r & 0 & | & \phi_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & r_Q & | & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & | & \dots & \dots \\ 0 \frac{\phi_{q0} - L_d i_{q0}}{3} & -\frac{kM_f i_{q0}}{3} & -\frac{kM_D i_{q0}}{3} & | & -\frac{\phi_{d0} + L_d i_{d0}}{3} & \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & | & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & | & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ -i_f \\ i_D \\ \dots \\ i_q \\ i_Q \\ \dots \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_d & kM_f & kM_D & | & 0 & 0 \\ kM_f & L_f & M_R & | & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & | & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & | & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & | & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dots \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_Q \end{bmatrix} pu$$

2.7 Modèle des lignes

La ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive B (due a l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G[21], [8].

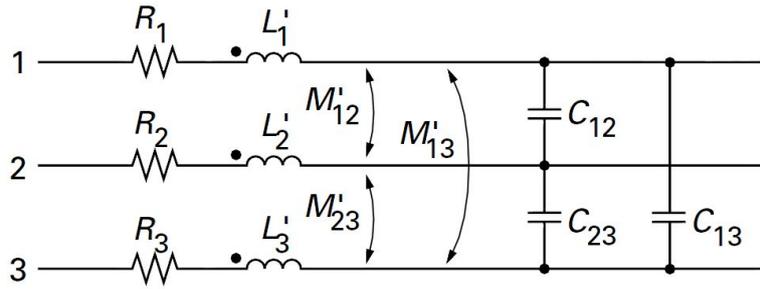


FIGURE 2.7: Modèle linéique complet d'une ligne triphasée

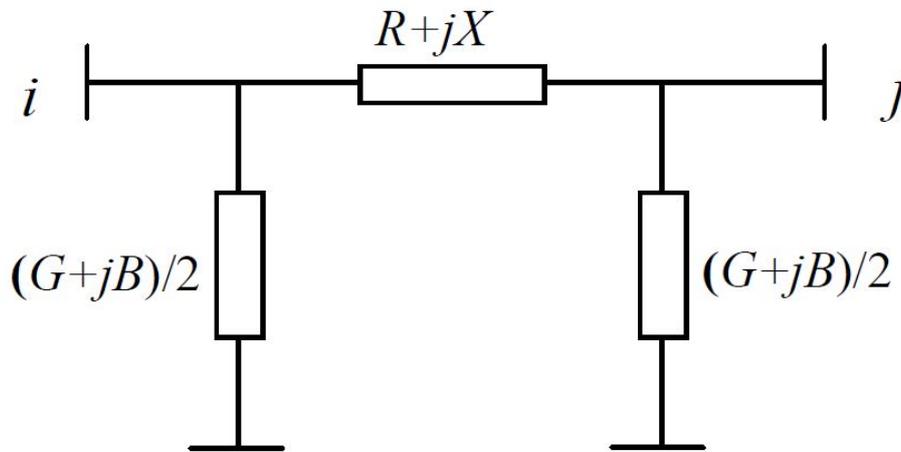


FIGURE 2.6: modèle en π de la ligne électrique

La matrice

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Avec

$$A = \cosh \gamma l$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l$$

$$D = \cosh \gamma l$$

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L) + (g + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

γ est la constante de propagation

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

est l'impédance caractéristique.

Le modèle complet d'une ligne triphasée est donné par le schéma suivant :

2.8 Modèle des câbles

A partir de quelques kV, les câbles utilisés sont de type unipolaire et à champ radial ce qui permet d'imposer la répartition du champ électrique en tous les points et d'éviter le risque de claquage de l'isolant. Ces câbles forment un système coaxial[21].

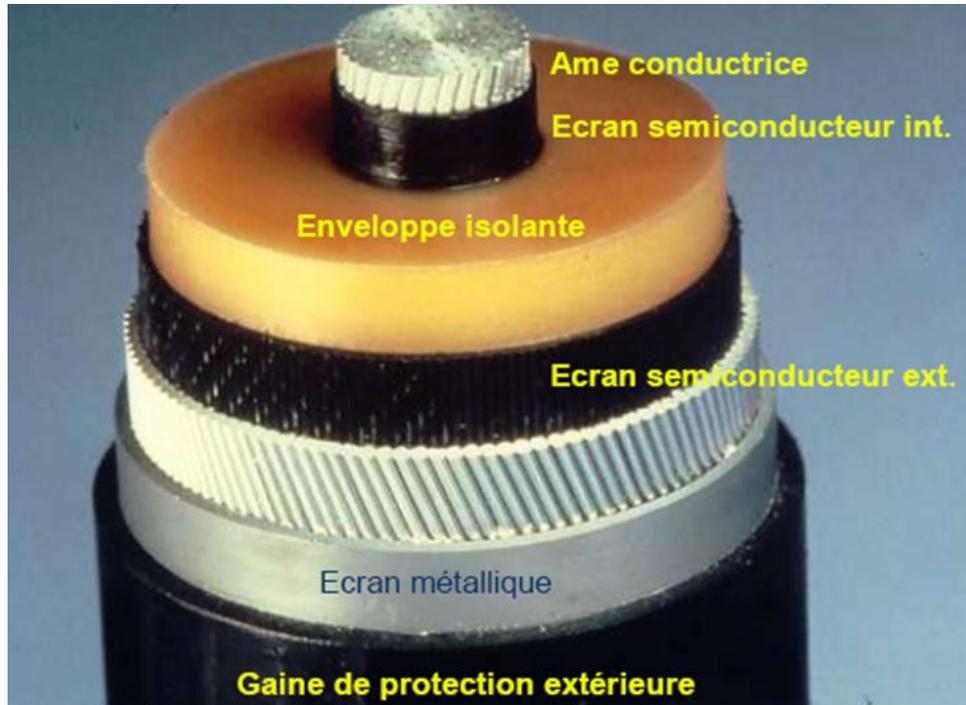


FIGURE 2.8: Câble souterrain

- Le conducteur ou l'âme est destiné à transiter le courant électrique. Il est obtenu par câblage de fils de cuivre ou d'aluminium.
- La gaine métallique externe est mise à la terre, elle permet de garantir un champ électrique radial et assure le retour des courants en cas de défaut. Cette gaine métallique est constitué d'un tube de plomb ou d'aluminium.
- Les écrans semi-conducteur permettent d'uniformiser le champ électrique au voisinage du conducteur et évitent les effets de pointe.
- L'isolant doit avoir une rigidité diélectrique élevée, une faible permittivité relative (pour limiter la valeur de la capacité linéique) et un faible angle de pertes.

D'un point de vue mathématique, un câble a exactement le même modèle que la ligne. La seule différence étant les valeurs des paramètres.[8] Le câble a une capacité linéique donnée par l'expression $c = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(\frac{R}{r})}$

Cette capacité linéique est de 15 à 20 fois supérieure à celle d'une ligne aérienne.

2.9 Modèle du transformateur

Le transformateur de puissance est un élément essentiel dans le réseau électrique, il permet l'augmentation des tensions relativement faibles à la sortie des centrales a des niveaux de tension très élevés pour le transport de l'énergie électrique. Du côté du client, le transformateur abaisse les tensions a des niveaux adaptés a l'utilisation. Dans les réseaux actuels, l'énergie peut subir de quatre à cinq transformations entre le générateur et l'utilisateur final.[7]

circuit équivalent du transformateur

Le transformateur est modélisé par son circuit équivalent. Le rapport de transformation ϑ peut être fixe comme il peut être variable comme dans les postes d'interconnexion.

A vide, les chutes de tension au primaire sont très faibles, on peut donc confondre E_1 et V_1 pour la détermination de I_0 on ramène les paramètres au primaire comme montré dans la figure.

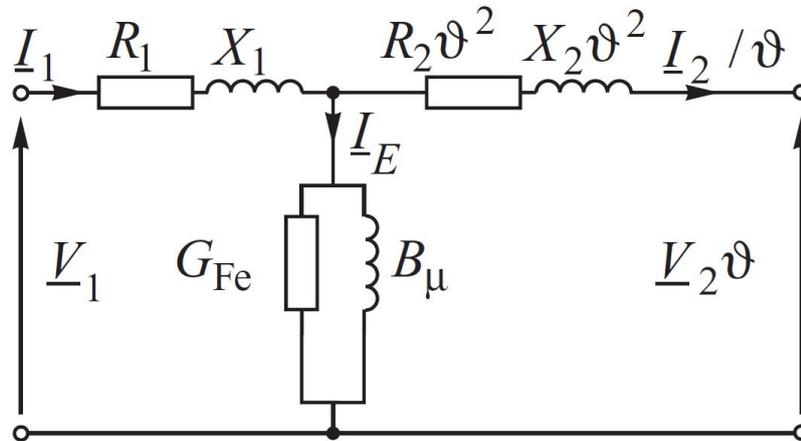
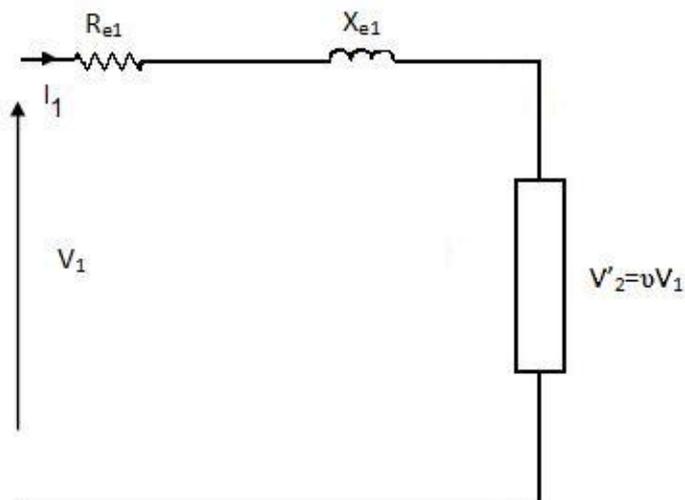


FIGURE 2.9: modèle du transformateur

Les transformateurs de puissance sont en général construits à partir de matériaux avec une grande perméabilité et des pertes fer négligeables, donc on peut par approximation éliminer la branche magnétisante et le circuit équivalent devient :



$$R_{e1} = R_1 + \vartheta^2 R_2; X_{e1} = X_1 + \vartheta^2 X_2$$

2.10 Conclusion

Il existe plusieurs façons de modéliser les composantes du réseau électrique et c'est la nature du problème étudié qui détermine le modèle à adopter. Dans ce chapitre nous avons développé

le modèle de la machine synchrone pour l'étude de la stabilité statique, ce qui justifie le choix d'un modèle du deuxième ordre, les modèles d'ordres supérieurs sont développés pour les études des perturbations de plus grande amplitude. Les lignes et les câbles ont été modélisés par leur modèle en π

Chapitre 3

Stabilité statique

3.1 Introduction

La stabilité statique est l'aptitude du système à retrouver le synchronisme après de petites et lentes perturbations comme par exemple un changement graduel de puissance. La stabilité statique est donc une condition nécessaire au fonctionnement du réseau électrique.[15] Un tel comportement peut être étudié dans un système linéaire en écrivant l'équation caractéristique du système. Les régulateurs automatiques de la tension et de la vitesse n'interviennent pas.

3.2 L'équation du mouvement

L'équation du mouvement régit le mouvement du rotor de la machine synchrone reliant ainsi son inertie aux couples électrique et mécanique.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a$$

J est le moment d'inertie de la turbine et du rotor de l'alternateur

θ_m est l'angle de déplacement du rotor par rapport à l'axe du stator

$$T_a = T_m - T_e$$

On a par convention :

$T_m > T_e$: accélération du couple T_a sur le rotor

$T_m < T_e$: ralentissement du couple T_a sur le rotor

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m$$

Où δ_m est la position du rotor à $t=0$ exprimé en radians

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt}$$

L'accélération du rotor est :

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2}$$

On remplace dans l'équation du mouvement :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e$$

En multipliant par ω_m les deux membres de l'équation du mouvement on obtient :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e$$

On sait que la puissance est le produit vitesse angulaire et du couple, donc :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e$$

L'énergie cinétique à la vitesse du synchronisme est donnée par la relation

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} J M \omega_m$$

Où M est le moment d'inertie

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m}$$

L'angle δ_m est un angle mécanique, donc pour passer des unités mécaniques aux unités électriques on multiplie par le nombre de paires de pôles $\frac{p}{2}$

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m$$

donc :

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m$$

En remplaçant dans l'équation du mouvement on obtient :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

L'étude des réseaux électriques nécessite de ramener tous les paramètres à un seul niveau de tension, pour cette raison le système d'unités réduites per unit a été adopté où les puissances sont divisées par une puissance de base S_B choisie. [7]

$$\frac{2}{p} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B}$$

Donc

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B}$$

on définit la grandeur H la constante d'inertie en per unit

$$H = \frac{W_k}{S_B}$$

$$\frac{2}{2p} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)}$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)}$$

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

3.3 Linéarisation de l'équation

La stabilité statique signifie que le système retrouve le synchronisme quand il est soumis à de petites et lentes perturbations. Il est pratique de supposer que les perturbations causant le changement disparaissent, la stabilité est donc assurée si le système retrouve son état initial. Un tel comportement peut être déterminé dans un système linéaire en étudiant son équation caractéristique. [7] On suppose que les régulateurs automatiques ne sont pas actifs. Afin d'illustrer le problème de la stabilité statique on considère un système d'une machine synchrone reliée à un réseau infini L'équation de mouvement devient :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta$$

L'équation de mouvement est une équation non linéaire de δ , cependant, pour les petites perturbations on peut linéariser l'équation de mouvement sans perdre sa précision. Pour cela on considère :

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta$$

En remplaçant dans l'équation de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} &= P_m - P_{max} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) \\ \frac{Hd^2\delta_0}{\pi f_0 dt^2} + \frac{Hd^2\Delta\delta}{\pi f_0 dt^2} &= P_m - P_{max} (\sin\delta_0 \cos\Delta\delta + \cos\delta_0 \sin\Delta\delta) \end{aligned}$$

comme $\Delta\delta$ est petit alors : $\cos\Delta\delta \cong 1$ et $\sin\Delta\delta \cong \Delta\delta$

Et on a donc :

$$\frac{Hd^2\delta_0}{\pi f_0 dt^2} + \frac{Hd^2\Delta\delta}{\pi f_0 dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta_0 - P_{max} \cos\delta_0 \Delta\delta$$

$$\frac{Hd^2\delta_0}{\pi f_0 dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta_0$$

$$\frac{Hd^2\Delta\delta}{\pi f_0 dt^2} + P_{max} \cos\delta_0 \Delta\delta$$

La quantité $P_s = P_{max} \cos\delta_0$ est la pente de la courbe de la puissance en fonction de l'angle δ au point δ_0 appelée *coefficient de synchronisme de la puissance*

$$P_s = \left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta_0}$$

Ce coefficient joue un rôle très important dans la détermination de la stabilité du système

L'équation de mouvement devient :

$$\frac{Hd^2\Delta\delta}{\pi f_0 dt^2} + P_s \Delta\delta = 0$$

La solution de cette l'équation différentielle dépend des racines de son équation caractéristique donnés par :

$$s^2 = -\frac{\pi f_0}{H} P_s$$

Le critère de stabilité de Lyapunov pour un système en petites perturbations dit :

"Le système est stable en petites perturbations si et seulement si toutes les valeurs propres de la matrice d'état A sont situées dans la partie gauche du plan complexe, autrement dit leur partie réelle est négative[16]"

Selon le signe de P_s on a Dans le cas où P_s est négatif on a une racine dans le demi plan droit, la réponse est une exponentielle croissante et la stabilité est perdue. Dans le cas où P_s est positif on a deux racines complexes conjuguées sur l'axe des imaginaires. Le système est stable avec une pulsation d'oscillation naturelle donnée par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H} P_s}$$

La stabilité statique est d'autant assurée que P_s est grand.[7] On peut voir que P_s est positif pour δ entre 0 et 90° avec une valeur maximum à $\delta_{00} =$ donc la stabilité est maximale à vide La courbe Puissance-angle nous montre que pour une puissance mécanique constante pour une petite variation de δ $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$ système reste stable, la limite de stabilité étant à $\delta = \frac{\pi}{2}$

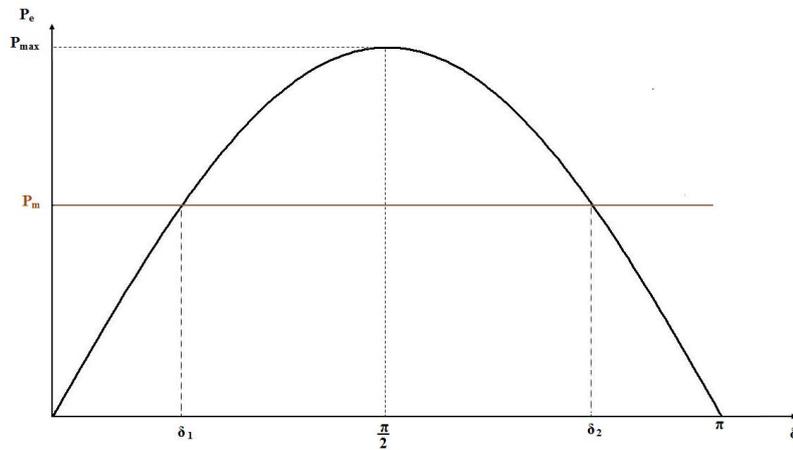


FIGURE 3.1: courbe des puissances en fonction de l'angle interne

Tant qu'il y a une différence entre la vitesse du rotor et celle du champs tournant résultant, un couple amortisseur tend à minimiser l'écart entre eux. La puissance d'amortissement est approximativement proportionnelle à la vitesse de déviation et s'écrit comme suit :

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt}$$

Avec D le facteur d'amortissement. En prenant en considération l'amortissement, l'équation linéarisée devient :

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} D \frac{d\delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_s \Delta \delta = 0$$

On peut mettre cette équation sous la forme :

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + 2\xi \omega_n \frac{d\Delta \delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta \delta = 0$$

où ξ est le facteur d'amortissement et son expression est :

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{H P_s}}$$

L'équation caractéristique est :

$$s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2 = 0$$

Dans les conditions normales de fonctionnement $\xi < 1$ donc les racines de l'équation caractéristique sont complexes conjuguées

$$s_1, s_2 = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

$$s_1, s_2 = \xi\omega_n + j\omega_d$$

où ω_d est la pulsation d'oscillation amortie

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

L'analyse de la stabilité statique peut se faire par deux méthodes : soit par le modèle d'état, soit par la fonction de transfert du système. Contrairement à la fonction de transfert qui ne spécifie que le comportement des entrées et des sorties, le modèle d'état décrit non seulement les entrées et les sorties du système mais aussi son comportement interne.[16]

On écrit le modèle d'état du système :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \Delta\delta & x_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \Delta\omega = \dot{\Delta}\delta & \dot{x}_2 &= -\omega_n^2 x_1 - 2\xi\omega_n x_2 \end{aligned}$$

En écrivant les équations d'état sous forme matricielle, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t)$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

On définit le vecteur de sortie

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Avec

$$y(t) = Cx(t)$$

La transformée de Laplace nous donne :

$$sX(s) - x(0) = AX(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}x(0)$$

$$(sI - A) = \begin{bmatrix} s & -1 \\ \omega_n^2 & s + 2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

$$X(s) = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\xi\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix} x(0)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Quand le mouvement du rotor est perturbé par un petit angle $\Delta\delta_0$ on a

$$x_1(0) = \Delta\delta_0 \text{ et } x_2(0) = \Delta\omega_0 = 0$$

On obtient alors :

$$\Delta\delta(s) = \frac{(s+2\xi\omega_n)\Delta\delta_0}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{\omega_n^2\Delta\delta_0}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$$

En appliquant la transformée de Laplace inverse on obtient :

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta)$$

$$\Delta\omega = -\frac{\omega_n\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin\omega_d t$$

θ étant donnée par l'expression :

$$\theta = \cos^{-1}\xi$$

L'angle δ varie selon l'expression :

$$\delta = \delta_0 + \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta)$$

Et sa pulsation est donnée par :

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_n\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin\omega_d t$$

La constante de temps de la réponse est :

$$\tau = \frac{1}{\xi\omega_n} = \frac{2H}{\pi f_0 D}$$

Dans la réalité la réponse du système est d'approximativement quatre fois la constante du temps

$$t_s = 4\tau$$

On remarque que si la constante d'inertie H augmente alors la pulsation naturelle du système ω_n et le facteur d'amortissement D diminuent alors que pour que P_s augmente il faut que ω_n augmente et que D diminue. La stabilité statique peut donc être améliorée soit en augmentant la tension d'excitation soit en diminuant la réactance totale.

3.4 Réponse du système aux petites perturbations de puissance

Maintenant, supposons que la puissance augmente de ΔP . La linearisation donne :

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_s \Delta\delta = \frac{\pi f_0}{H} \Delta P$$

On met l'équation sous la forme :

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n\Delta\delta = \Delta u$$

avec

$$\Delta u = \frac{\pi f_0}{H} \Delta P$$

Le modèle d'état du système devient :

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta \delta & x_2 &= \Delta \omega = \dot{\Delta \delta} \\ \dot{x}_1 &= x_2 & \dot{x}_2 &= -\omega_n^2 x_1 - 2\xi \omega_n x_2 \end{aligned}$$

En mettant sous forme matricielle on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u$$

Le modèle d'état est sous la forme

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\Delta u(t)$$

La transformation de Laplace nous donne

$$X(s) = (sI - A)^{-1}X(s) + B\Delta U(s)$$

Avec

$$\Delta U(s) = \frac{\Delta u}{s}$$

Ce qui nous donne en remplaçant A et B

$$X(s) = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\xi \omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{\Delta u}{s}}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

on a donc :

$$\Delta \delta(s) = \frac{\Delta u}{s(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2)}$$

et

$$\Delta \omega(s) = \frac{\Delta u}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

La transformée inverse de Laplace donne :

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= \frac{\Delta u}{\omega_n^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \right] \\ \Delta \omega &= \frac{\Delta u}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin \omega_d t \end{aligned}$$

L'angle interne δ devient finalement :

$$\delta = \delta_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \right]$$

Et la pulsation devient :

$$\omega = \omega_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin \omega_d t$$

La linéarisation permet de traiter le système

3.5 Résolution de l'équation du mouvement par des méthodes numériques

Il existe plusieurs techniques de résolution numérique des équations différentielles. L'algorithme d'Euler étant le plus simple mais le moins précis. On suppose que la puissance mécanique P_m est constante, au point de fonctionnement $P_m = P_e$ et la valeur initiale de l'angle interne est donnée par

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max}}$$

Avant que la perturbation n'ait lieu, le rotor tourne à la vitesse de synchronisme, donc :

$$\Delta\omega_0 = 0$$

L'équation de mouvement devient :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_m - P_{max} \sin\delta = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

On peut mettre cette équation sous forme de variables d'état :

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

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

3.6 Modes d'oscillations d'un réseau multimachines non régulé

Dans un réseau multimachines à n machines, la puissance électrique de la machine i est :

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (B_{ij} \sin\delta_{ij} + G_{ij} \cos\delta_{ij})$$

En utilisant le modèle numérique $\delta_{ij} = \delta_{ij0} + \delta_{ij\Delta}$ on peut faire les approximations suivantes :

$$\sin\delta_{ij} \cong \sin\delta_{ij0} + \delta_{ij\Delta} \cos\delta_{ij0}$$

$$\cos\delta_{ij} \cong \cos\delta_{ij0} - \delta_{ij\Delta} \sin\delta_{ij0}$$

Finalement :

$$P_{ei\Delta} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j (B_{ij} \cos\delta_{ij0} + G_{ij} \sin\delta_{ij0}) \delta_{ij\Delta}$$

$$P_{ei\Delta} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta}$$

Avec :

$$P_{sij} = E_i E_j (B_{ij} \cos\delta_{ij0} + G_{ij} \sin\delta_{ij0})$$

P_{sij} est la variation de la puissance électrique de la machine i due à la variation de l'angle interne entre les machines i et j en maintenant les autres angles constants. C'est l'équivalent du

coefficient de synchronisme de la puissance dans un système à une machine reliée à un réseau infini.

En utilisant le modèle de la machine synchrone vu précédemment pour un système multimachines ,on obtient un système de n équations différentielles :

$$\frac{d^2\delta_{i\Delta}}{dt^2} + \frac{2\pi f_0}{H_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta} = 0$$

L'équation peut être écrite sous la forme :

$$\frac{d^2\delta_{i\Delta}}{dt^2} - \frac{d^2\delta_{n\Delta}}{dt^2} + \frac{2\pi f_0}{H_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{sij} \delta_{ij\Delta} - \frac{2\pi f_0}{H_n} \sum_{j=1}^{n-1} P_{snj} \delta_{nj\Delta} = 0$$

On sait que :

$$\delta_{ij\Delta} = \delta_{in\Delta} - \delta_{jn\Delta}$$

On aura finalement :

$$\frac{d^2\delta_{in\Delta}}{dt^2} + \sum_{j=1}^{n-1} \alpha_{ij} \delta_{jn\Delta} = 0 \quad i=1,2,\dots,n-1$$

Les coefficients α_{ij} dépendent des inerties des machines et de leurs coefficients de synchronisme. Considérons x_1, x_2, \dots, x_{n-1} les angles $\delta_{1n\Delta}, \delta_{2n\Delta}, \dots, \delta_{(n-1)n\Delta}$ et x_n, \dots, x_{2n} les dérivées des angles $\delta_{in\Delta}$

on obtient une matrice de la forme

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & | & I \\ \vdots & | & \vdots \\ A & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_2 \end{bmatrix}$$

où :

I : la matrice identité

x_1 :vecteur de la variation des angles $\delta_{in\Delta}$

x_2 :vecteur de la variation des vitesses $\frac{\delta_{in\Delta}}{dt}$

Pour connaître la réponse du système il suffit de vérifier ses valeurs propres λ

$$\det \begin{bmatrix} -\lambda I & | & I \\ \vdots & | & \vdots \\ A & | & -\lambda I \end{bmatrix} = 0$$

donc

$$|-\lambda I| |(-\lambda I - A(-\lambda I)^{-1}I)| = |\lambda^2 I - A| = 0$$

Ce système a $2(n-1)$ racines imaginaires ce qui donne $n-1$ paires de racines complexes conjuguées, le système a donc $n-1$ pulsations d'oscillation.[18]

3.7 Effet des régulateurs sur la stabilité statique

La première solution aux problèmes d'oscillations des réseaux électriques a été d'équiper les alternateurs d'enroulements d'amortisseurs. Cependant, cette solution est insuffisante quand les réseaux s'approchent de leur limite de stabilité. Les régulateurs ont pour rôle de contrôler les machines synchrones pour délivrer la puissance au réseau de façon aussi économique et

fiable que possible en maintenant la tension et la fréquence dans leurs limites admissibles de fonctionnement. ils contribuent ainsi au maintien de la stabilité dans les réseaux.

Comme pour les machines synchrones, les équations des régulateurs peuvent être linéarisées pour les petites perturbations.

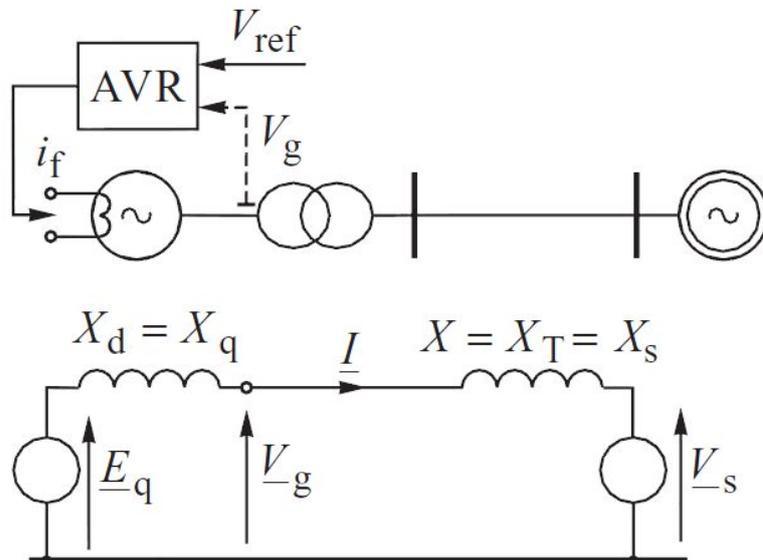


FIGURE 3.2: Régulateur de tension

Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine afin de compenser l'effet de la réaction magnétique d'induit de la machine et en diminuant le couple d'amortissement et ainsi augmenter le coefficient de synchronisme. Une caractéristique très importante du régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation[18]

Afin de faire face aux problèmes d'oscillations et d'augmenter la stabilité, des boucles de régulation supplémentaires appelées PSS ont été ajoutées aux régulateurs de tension AVR. Ces correcteurs sont destinés à fournir un couple agissant contre les modes oscillatoires qui apparaissent suite à une perturbation.

3.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté la stabilité statique appelée aussi stabilité aux petites perturbations, nous avons établi l'équation du mouvement du système et la réponse du système aux petites perturbations angulaires puis à un échelon de puissance. Comme les perturbations sont de faible amplitude, on a pu linéariser le système et traiter le problème de stabilité en appliquant les méthodes de l'automatique à savoir, l'analyse modale ou les critères de stabilité relatifs aux fonctions de transfert.

Chapitre 4

Méthodes de calcul et applications

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on va mettre en exécution tout ce qu'on a mis en évidence dans les chapitres ultérieurs par le biais d'exemples numériques qui concrétisent les équations mathématiques. Mais avant les exemples numériques on va expliquer la méthode de déroulement de la simulation avec les hypothèses de travail proposées.

4.2 Méthode analytique

Dans les réseaux simples c'est-à-dire les réseaux qui ne comportent qu'une seule machine et des charges passives, la description analytique de l'évolution des paramètres de la machine en cas de défaut est employée. L'application de la méthode analytique est possible dans le cas où la vitesse peut être considérée comme constante. Les équations de la machine décrivent précisément son comportement[17].

4.3 Simulation numérique

Cette méthode est actuellement la plus utilisée dans le monde. Un ordinateur résout par des méthodes numériques les systèmes d'équations qui décrivent le comportement du réseau électrique. La puissance des ordinateurs aujourd'hui permet de faire des simulations de réseaux très importants en des temps relativement courts.

Hypothèses

Tous les générateurs, charges, et récepteurs contribuent au fonctionnement de l'ensemble et réagissent les uns sur les autres, la dimension du problème est donc très grande et, pour pouvoir faire une simulation correcte et fiable, il convient de simplifier les données de façon à ne représenter que quelques dizaines de machines. pour cela on pose les hypothèses suivantes :

1. Regrouper les charges passives, supposées constantes sont représentées par leurs admittances équivalentes ;
2. Regrouper les moteurs sous forme de moteurs équivalents ;
3. Regrouper les générateurs de telle sorte que chaque une des machines synchrones est représentée par une source de tension constante derrière sa réactance transitoire directe X'_d ;
4. Les machines débitant sur le même poste sont représentées par la même machine équivalente ;

5. Les effets des saillances sont négligés.

déroulement d'une étude de stabilité

Une étude de stabilité doit suivre une certaine logique se décompose donc en plusieurs étapes :

Les préliminaires aux calculs

Comme la précision des résultats est directement liée à l'exactitude des données, l'étude doit commencer par une collecte de données du réseau en s'assurant d'avoir des valeurs numériques exactes des caractéristiques des composants du réseau. Ensuite vient le calcul des écoulements de puissances "load flow" qui se fait par un programme spécifique basé sur l'algorithme de Newton-Raphson qui donne les tensions aux nœuds et les puissances transitées dans les branches.

Les simulations

La topologie et les composants du réseau varient d'une étude à l'autre ainsi que la perturbation. Les calculs reproduisent la prévision du comportement du réseau à la perturbation envisagée

Les résultats

Les résultats se traduisent essentiellement par des courbes d'évolution dans le temps des :

1. Tensions sur les jeux de barres
2. Puissances transitées
3. Données des machines : vitesse, couples électrique et mécanique, excitation

Ces résultats permettent de vérifier la stabilité. ils permettent également de connaître la capacité de secours possible en cas de défaut pour pouvoir confirmer le plan de protection.[17]

4.4 Générateur relié à un réseau infini

Afin de mieux illustrer les phénomènes liés à la stabilité statique dans la machine synchrone on prend l'exemple d'un générateur relié à un réseau infini à travers deux lignes

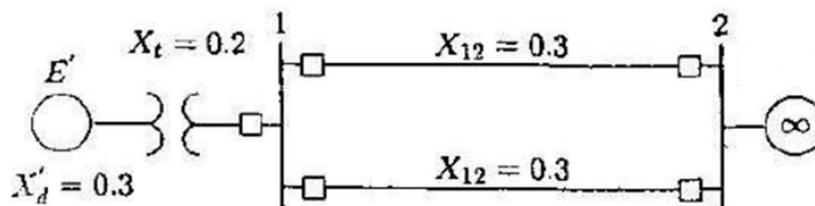


FIGURE 4.1: Machine reliée à un réseau infini

La machine synchrone ayant les caractéristiques suivantes :

X_d (per unit)	X_q (per unit)	X'_d (per unit)
1.0	0.6	0.3

Il est à noter que la constante d'inertie de la machine synchrone est égale à $H=9.94$ MJ/MVA.

Le réseau infini est pris comme le nœud balancier «slack bus» avec une tension $V=1.05$ per unit.

De ces données on calcule :

$$X = X'_d + X_t + X_{12}/2 = 0.3 + 0.2 + \frac{0.3}{2} = 0.65 \text{ pu}$$

$$S = \frac{0.6}{0.8} \angle \cos^{-1} 0.8 = 0.75 \angle 36.87^\circ \text{ pu}$$

$$I = \frac{S^*}{V^*} = 0.714 \angle 36.87^\circ \text{ pu}$$

$$E' = V + j X I = 1.31 \angle 16.79^\circ \text{ pu}$$

Les résultats de la simulation sont comme suit :

1. En utilisant les équations développées dans le chapitre précédent écrite en commande «Matlab» :

P_m pu	D pu	f_0 Hz	P_{max} pu	d_0 pu	P_s pu	ω_n rd/s	z pu	f_d Hz	τ s	θ rd
0.600	0.138	50	2.116	0.287	2.029	6.203	0.210	0.965	0.764	1.358

La simulation avec « Matlab » donne les résultats suivants :

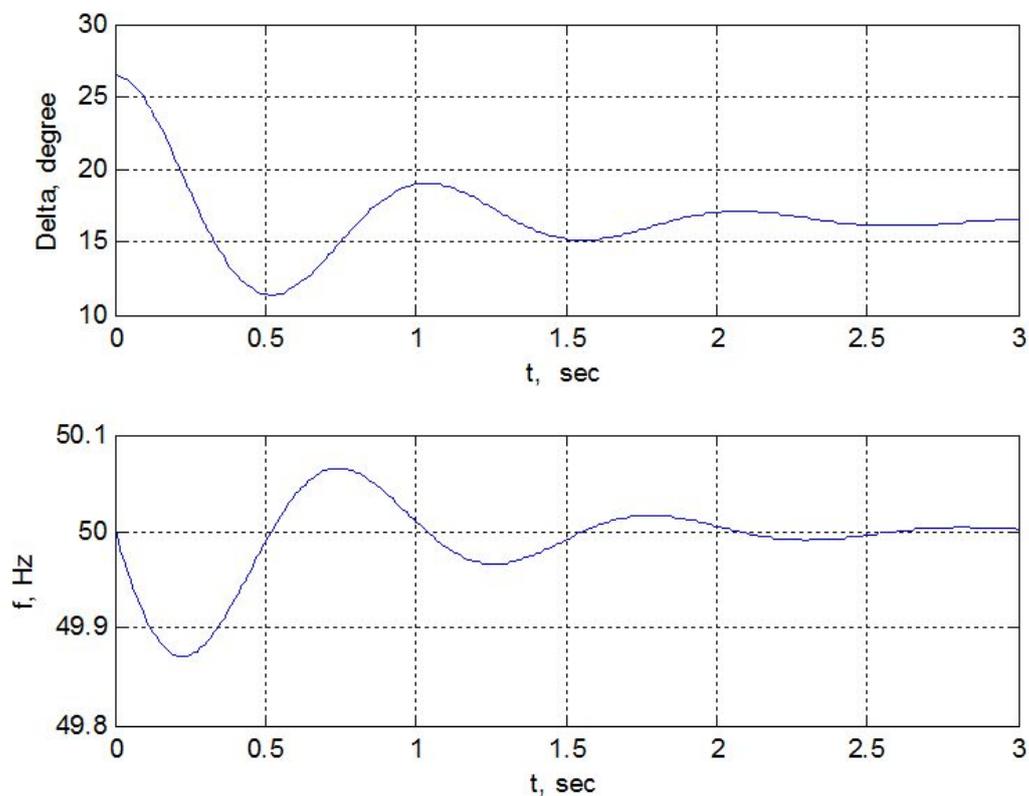


FIGURE 4.2: Variation de l'angle interne et de la fréquence sur 3s

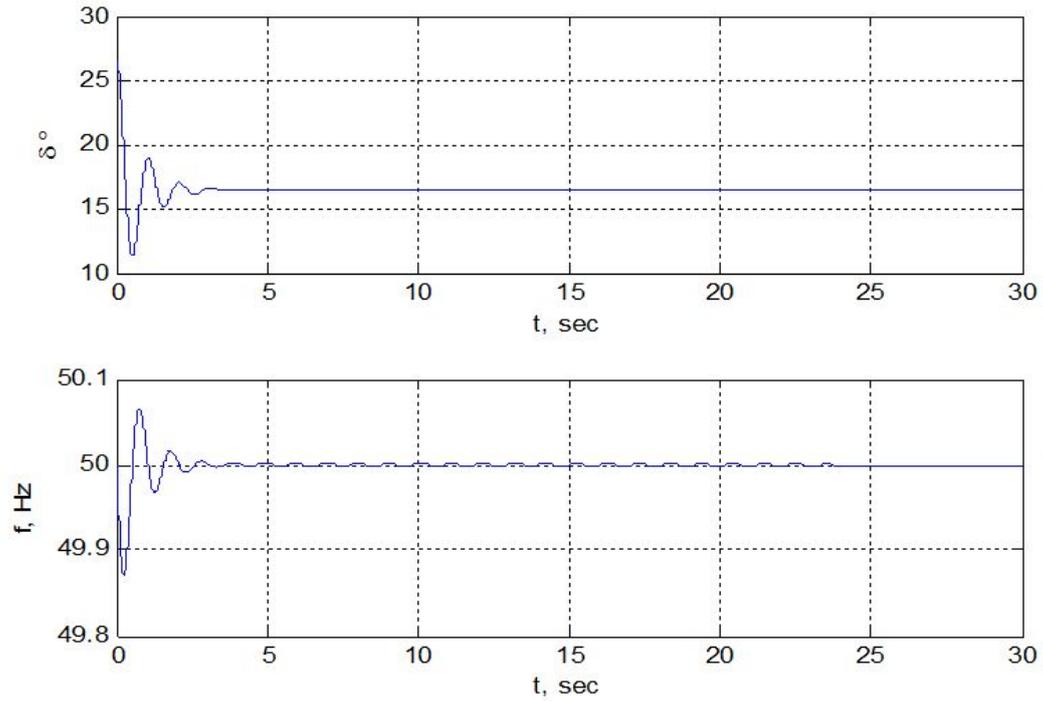


FIGURE 4.3: Variation de l'angle interne et de la fréquence sur 30s

En utilisant le modèle d'état on a les résultats suivants :

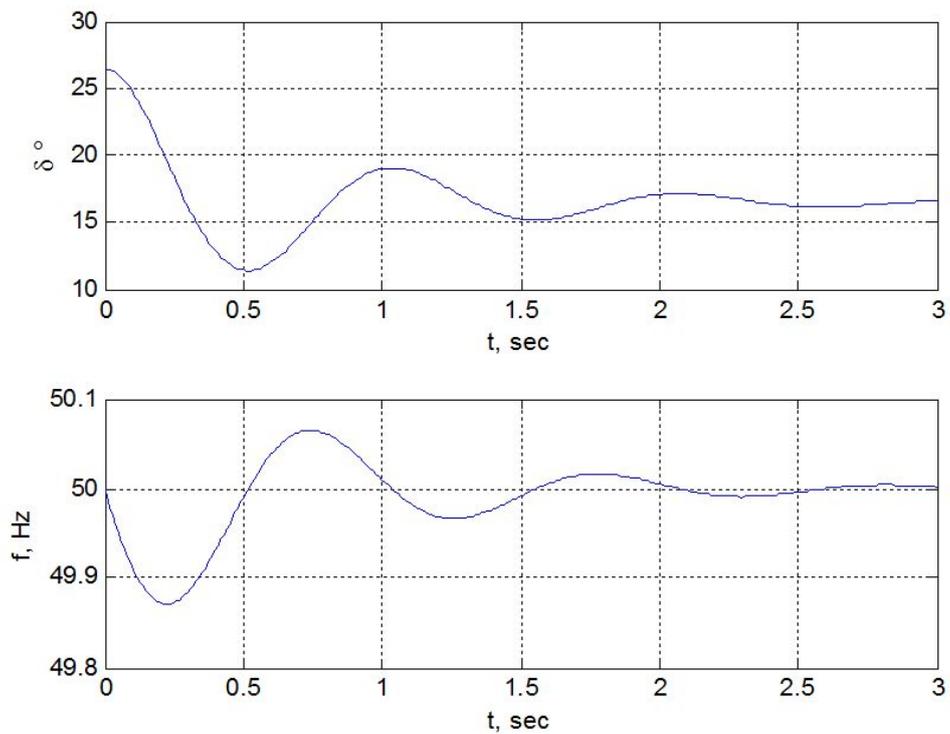


FIGURE 4.4: Résultat de la simulation en utilisant le modèle d'état sur 3s

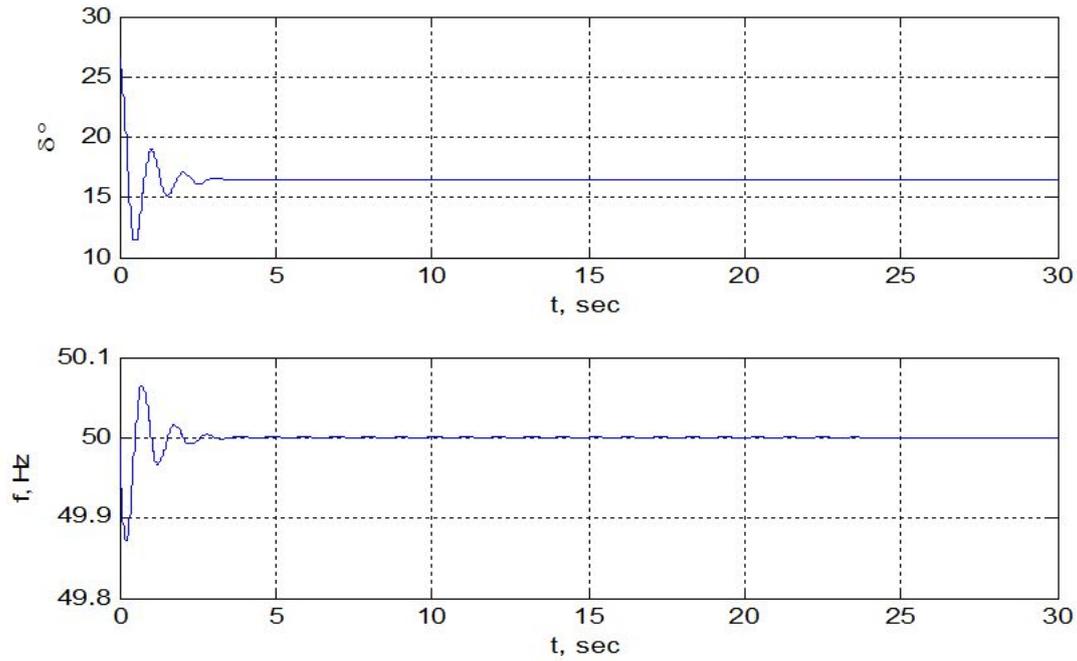


FIGURE 4.5: Résultat de la simulation en utilisant le modèle d'état sur 30s

On constate que les résultats de la simulation sont exactement les mêmes dans le cas d'une machine reliée à un réseau infini en adoptant l'une ou l'autre des méthodes d'analyse de la stabilité, c'est à dire l'analyse modale ou la fonction de transfert. La réponse montre qu'une petite perturbation sera suivie par une oscillation relativement lente amortie du rotor, avant l'opération l'état d'équilibre à la vitesse synchrone est reprise. Dans le cas d'un générateur à turbine à vapeur, les oscillations disparaissent dans une affaire de deux à trois secondes. Dans notre cas, la réponse s'établit à environ $ts = 4\tau = 3.1$ secondes. Nous observons également que l'oscillation est faible en fréquence, autour de 0,955 Hz.

La réponse du système a un échelon de puissance donne :

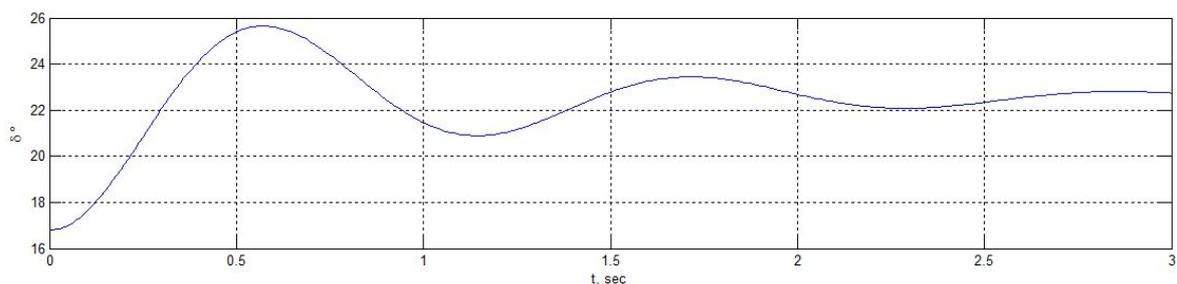


FIGURE 4.6: Variation de l'angle interne a un échelon de puissance

On obtient exactement le même résultat en simulant grâce au modèle d'état du système. On continue sur cet exemple avec son schéma bloc et pour cela on utilise « simulink » et on obtient :

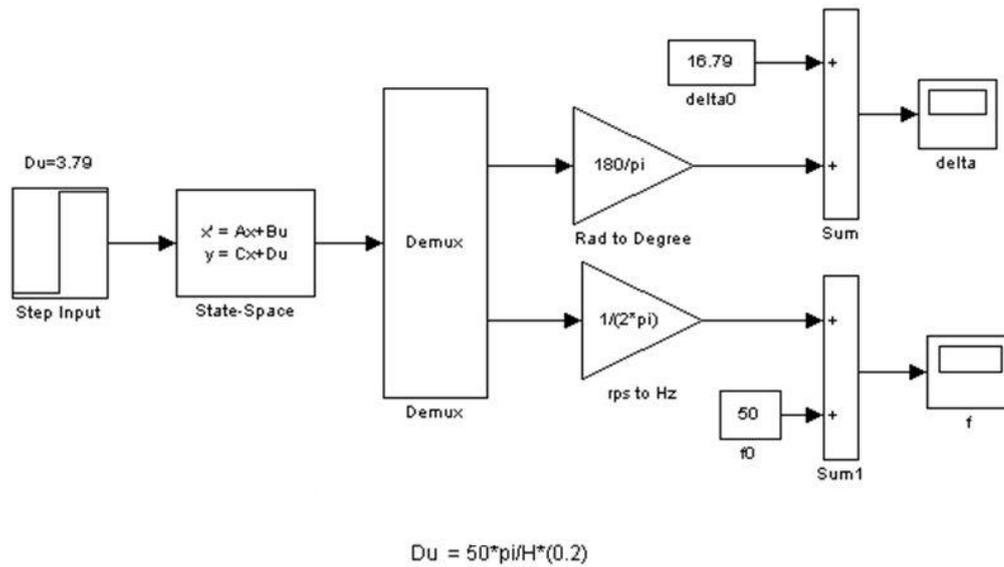


FIGURE 4.7: le schéma bloc du le schéma bloc du système générateur relié à un réseau infini

Les figures de l'angle interne et de la fréquence résultantes de la simulation du schéma bloc sont respectivement :

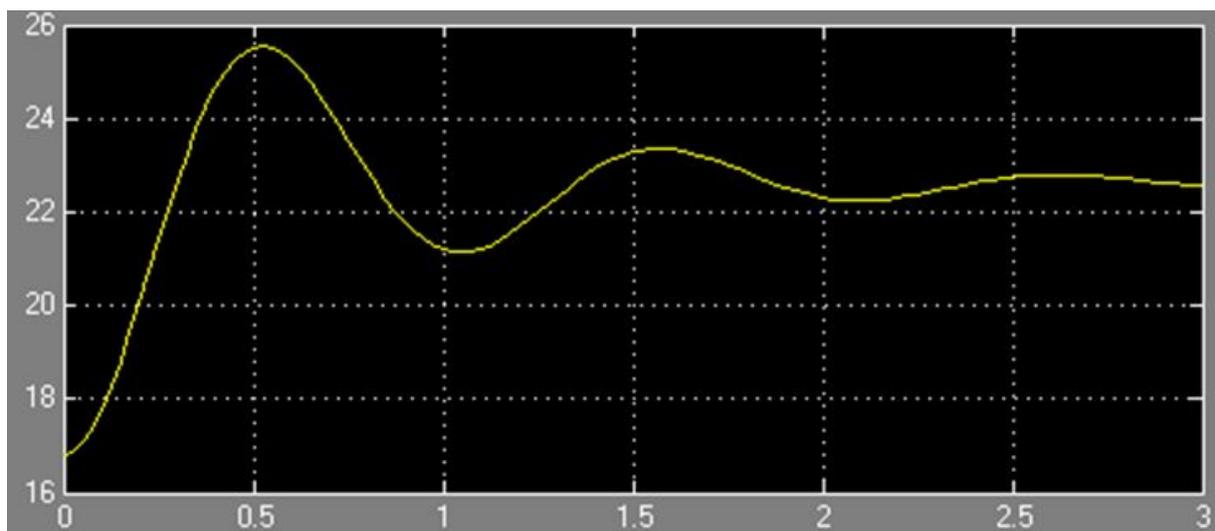


FIGURE 4.8: Courbe de l'angle interne en fonction du temps résultante du schéma bloc

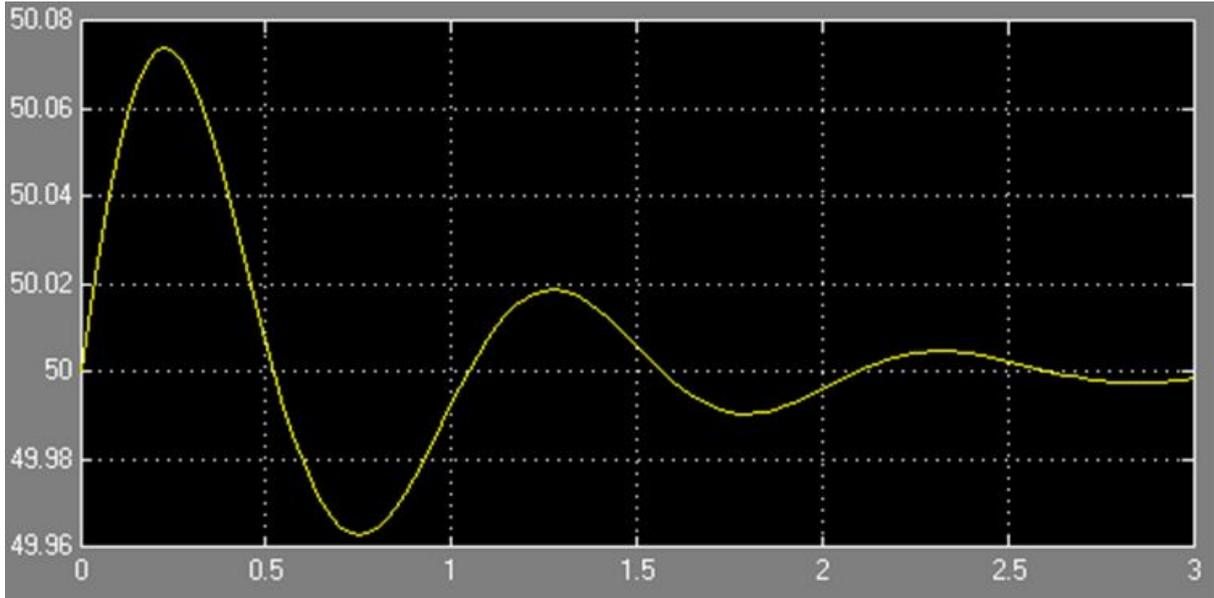


FIGURE 4.9: Courbe de la fréquence en fonction du temps résultante du schéma bloc

La réponse montre que les oscillations disparaissent dans environ 3,1 secondes et un nouveau point d'équilibre d'exploitation est restaurée à l'état initial à $\delta = 22,5^\circ$. Pour l'équation de mouvement linéarisée, la stabilité est assurée.

4.5 Réseau multimachines

Dans cette partie nous allons étudier la stabilité statique du réseau multi-machines IEEE 5 nœuds. Le schéma et les données du réseau IEEE 5 sont en annexe A La simulation a été réalisée à l'aide de PSAT (power system analysis toolbox) de Matlab

Étude de l'influence de l'amortissement sur la stabilité statique

Les résultats de la simulation sont : Les valeurs propres de la matrice A sont :

Nœud	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P charge [p.u.]	Q charge [p.u.]
1	1.06000	0.00000	0.28778	1.11608	0.00000	0.00000
2	1.04500	0.00184	0.40000	-0.27788	0.25069	0.12535
3	1.03000	0.00040	0.30000	-0.76964	0.24355	0.12177
4	1.03000	-0.00257	0.00000	0.00000	0.24355	0.12178
5	1.01769	-0.01637	-0.00000	0.00000	0.23776	0.14266

TABLE 4.1: Résultats d'écoulements de puissance pour D=0

Valeur propre	Variables d'état dominantes	Partie réelle	Partie imaginaire	ω_d	ω_n
λ_1	δ_3, ω_3	0.00101	61.01799	9.71129	9.71129
λ_2	δ_3, ω_3	0.00101	-61.01799	9.71129	9.71129
λ_3	ω_1, δ_1	0.00058	44.61171	7.10016	7.10016
λ_4	ω_1, δ_1	0.00058	-44.61171	7.10016	7.10016
λ_5	E_{q3}	-0.14976	0.00000	0.00000	0.00000
λ_6	E_{q1}	-0.13757	0.00000	0.00000	0.00000
λ_7	E_{q2}	-0.12500	0.00000	0.00000	0.00000
λ_8	ω_2	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_9	δ_2	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

TABLE 4.2: Valeurs propres de la matrice d'état

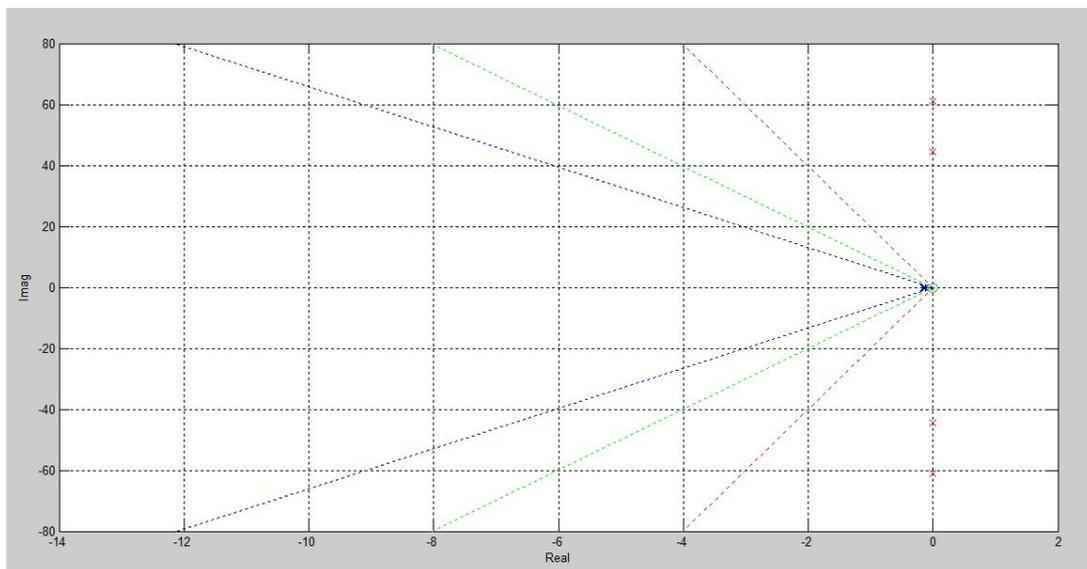


FIGURE 4.10: Représentation des valeurs propres dans le plan complexe pour $D=0$

On remarque ici que les valeurs propres λ_1, λ_2 et λ_3, λ_4 sont complexes conjuguées à partie réelle positive, ce qui correspond à des modes oscillatoires divergents. On remarque également que les variables dominantes de ces valeurs propres sont respectivement λ_3, ω_3 et λ_1, ω_1 . On conclut donc que les machines 1 et 3 fonctionnent en instabilité.

λ_8 et λ_9 sont nulles et ont pour variable d'état dominantes λ_2, ω_2 , la machine 2 est donc à la limite de la stabilité.

En tenant compte de l'amortissement on obtient les résultats suivants :

Les valeurs propres

Nœud	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P charge [p.u.]	Q charge [p.u.]
1	1.06000	0.00000	-0.29288	0.46883	0.00000	0.00000
2	1.04500	0.01942	0.40000	-0.14563	0.10000	0.05000
3	1.03000	0.02218	0.30000	-0.23668	0.10000	0.05000
4	1.02876	0.01754	0.00000	0.00000	0.10000	0.05000
5	1.01014	-0.00150	-0.00000	0.00000	0.10000	0.06000

TABLE 4.3: Résultats d'écoulements de puissance en tenant compte de l'amortissement

Valeur propre	Variables d'état dominantes	Partie réelle	Partie imaginaire	ω_d	ω_n
λ_1	δ_3, ω_3	-0.12400	30.63647	4.87593	4.87597
λ_2	δ_3, ω_3	-0.12400	-30.63647	4.87593	4.87597
λ_3	δ_1, ω_1	-0.12444	22.38725	3.56303	3.56309
λ_4	δ_1, ω_1	-0.12444	-22.38725	3.56303	3.56309
λ_5	δ_2	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_6	E_{q3}	-0.14971	0.00000	0.00000	0.00000
λ_7	E_{q1}	-0.13746	0.00000	0.00000	0.00000
λ_8	E_{q1}	-0.12493	0.00000	0.00000	0.00000
λ_9	ω_2	-0.25000	0.00000	0.00000	0.00000

TABLE 4.4: Valeurs propres de la matrice d'état en tenant compte de l'amortissement

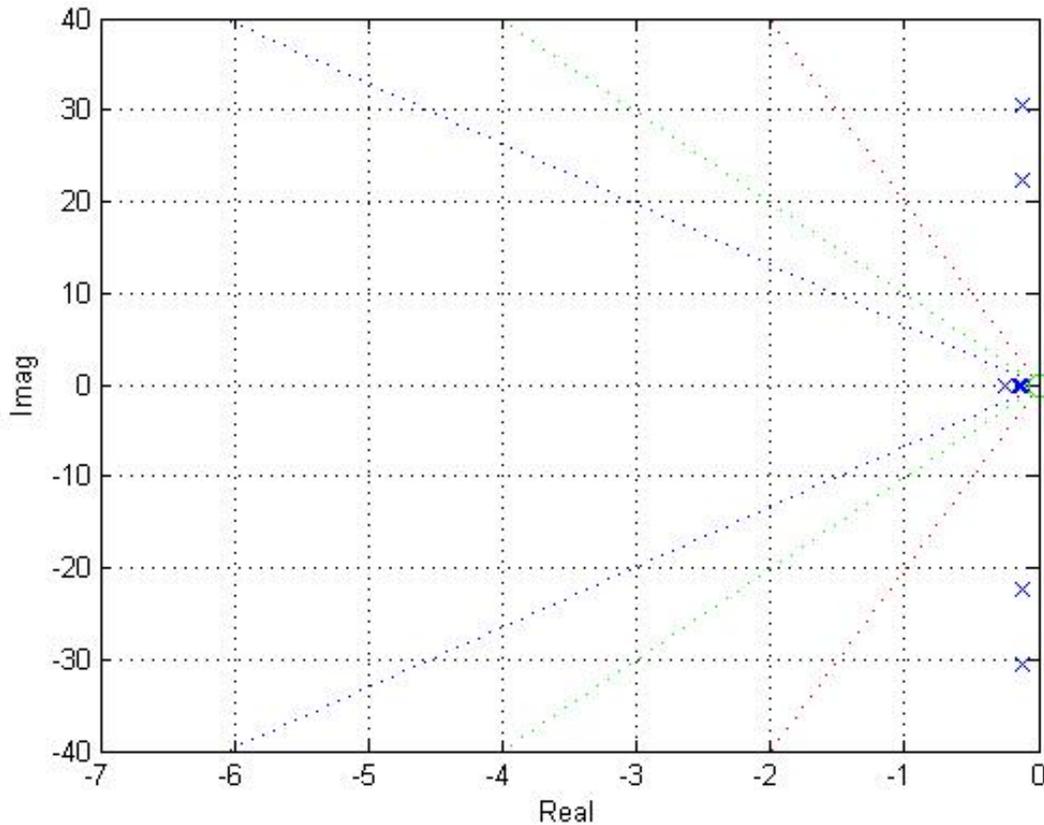


FIGURE 4.11: Représentation des valeurs propres dans le plan complexe en tenant compte de l'amortissement

Les résultats montrent que les valeurs propres sont à partie réelle négative ce qui signifie que le système est stable. On remarque cependant que λ_5 est nulle ce qui ne veut pas dire que le système est instable car dans un réseau multimachines, chaque angle interne et vitesse fait référence à une machine synchrone fictive idéale connectée au réseau. par conséquent, la matrice d'état contient une valeur propre qui n'est pas symptôme d'instabilité mais qui est plutôt une caractéristique intrinsèque du modèle de la machine[18].

L'amortissement est donc un indicateur important de la qualité de la réponse transitoire du système c'est-à-dire qu'un système mal amorti va osciller pendant relativement un long moment et risque même de basculer dans l'instabilité.

Effet du régulateur de tension

Nœud	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P charge [p.u.]	Q charge [p.u.]
1	1.06000	0.00000	-0.29288	0.46883	0.00000	0.00000
2	1.04500	0.01942	0.40000	-0.14563	0.10000	0.05000
3	1.03000	0.02218	0.30000	-0.23668	0.10000	0.05000
4	1.02876	0.01754	0.00000	0.00000	0.10000	0.05000
5	1.01014	-0.00150	-0.00000	0.00000	0.10000	0.06000

TABLE 4.5: Résultats d'écoulements de puissances en présence des régulateurs de tension

Les valeurs propres

Valeur propre	Variables d'état dominantes	Partie réelle	Partie imaginaire	ω_d	ω_n
λ_1	V_{r2}	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_2	V_{r1}	-10.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_3	V_{r2}	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_4	V_{r3}	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_5	V_{r3}	-10.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_6	V_{r3}	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_7	V_{f1}, v_{m1}	-7.02974	92.61301	14.73978	14.78218
λ_8	V_{f1}, v_{m1}	-7.02974	-92.61301	14.73978	14.78218
λ_9	δ_1, ω_1	-0.19575	7.53158	1.19869	1.19909
λ_{10}	δ_1, ω_1	-0.19575	-7.53158	1.19869	1.19909
λ_{11}	δ_3, δ_2	-0.23510	5.97842	0.95149	0.95223
λ_{12}	δ_3, δ_2	-0.23510	-5.97842	0.95149	0.95223
λ_{13}	V_{r1}	-2.21827	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{14}	δ_3	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{15}	E_{q3}	-0.55066	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{16}	ω_1	-0.22482	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{17}	E_{q2}	-0.20007	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{18}	V_{f2}	-10.54173	0.00000	0.00000	0.00000
λ_{19}	V_{f3}	-13.39863	0.00000	0.00000	0.00000

TABLE 4.6: Valeurs propres de la matrice d'état en présence des régulateurs de tension

Les régulateurs de tension ont permis d'améliorer la stabilité du système en éloignant les pôles vers la gauche dans le plan complexe.

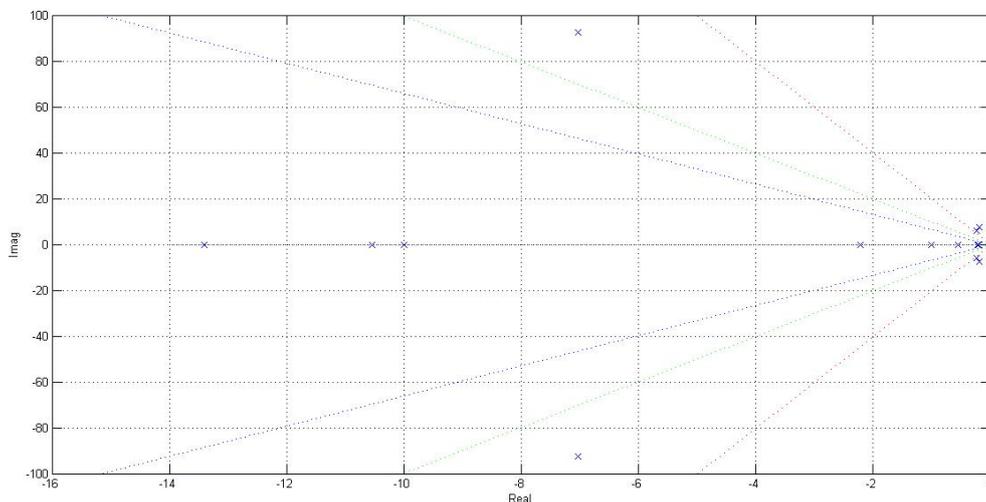


FIGURE 4.12: Représentation des valeurs propres de la matrice d'état dans le plan complexe en présence des régulateurs de tension

L'action du régulateur a deux impacts très importants sur la stabilité du système. D'abord, il augmente le couple synchronisant et donc la stabilité. D'un autre côté les systèmes d'excitation modernes, ayant une réponse rapide et une action puissante diminuent le couple d'amortissement[9]. Le courant d'excitation, qui agit pour améliorer le couple synchronisant, est toujours en retard sur les caractéristiques temporelles correspondantes aux parties électriques du générateur et aux autres parties électriques du système. A partir du moment de l'identification du changement désiré d'excitation, le système d'excitation subit donc un temps de retard inévitable. Pendant ce temps, l'état du système oscillant va changer en impliquant un nouvel ajustement du courant d'excitation. Le système d'excitation reste donc en retard, par rapport au changement nécessaire. Par conséquent, le système d'excitation va introduire l'énergie demandée à contre temps. Les courants ainsi induits dans les circuits du rotor s'opposent aux courants induits initiés par l'écart de vitesse du rotor. Le couple d'amortissement diminuera pouvant atteindre des valeurs négatives : le comportement oscillatoire du générateur va donc augmenter et une perte de stabilité peut avoir lieu. Donc seul un choix judicieux des paramètres des régulateurs peut réaliser le compromis entre son action de contrôle et le maintien de la stabilité.

En faisant une représentation de la variation des angles internes $\delta_1; \delta_2, \delta_3$ on obtient : Pour 20 secondes :

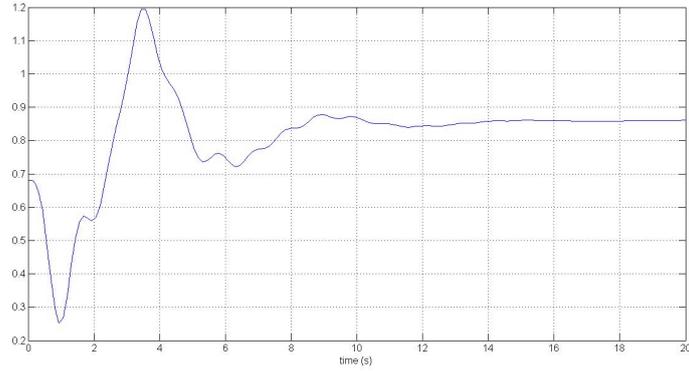


FIGURE 4.13: Variation de l'angle interne de la machine 1 dans le temps

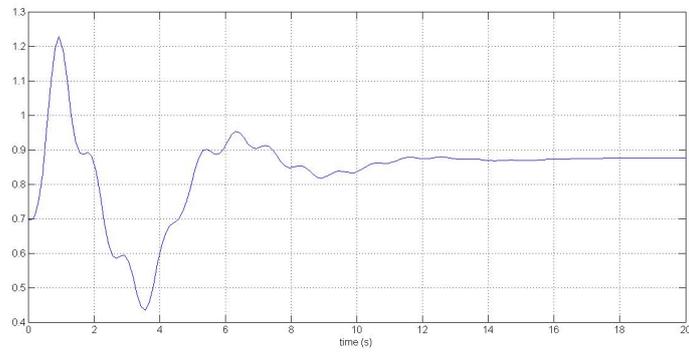


FIGURE 4.14: Variation de l'angle interne de la machine 2 dans le temps

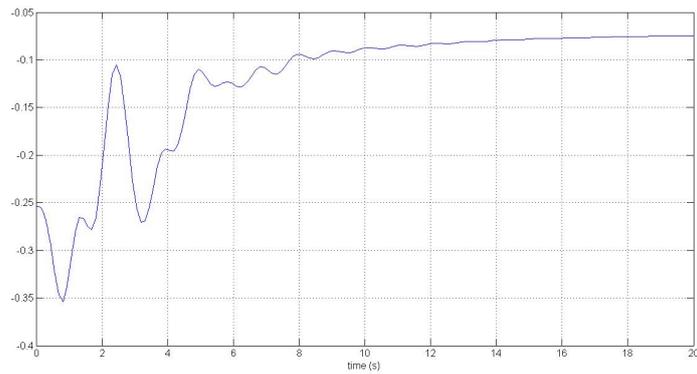


FIGURE 4.15: Variation de l'angle interne de la machine 3 dans le temps

La représentation de la variation des angles internes dans le temps nous montre que les oscillations s'amortissent au bout de 10s et les machines retrouvent leurs nouveaux points de fonctionnement Ceci montre que la stabilité locale au niveau de chaque machine est maintenue.

Conclusion générale

Les réseaux électriques n'ont cessé de se développer et l'extension des réseaux interconnectés rend les systèmes fortement sensibles aux oscillations. Ces oscillations peuvent sérieusement restreindre le transport de l'énergie électrique. De plus, l'augmentation de la demande oblige les exploitants à faire fonctionner le système aux limites de la stabilité. Par conséquent, l'amélioration de la stabilité aux petites perturbations, en particulier l'amortissement des oscillations, représente un objectif prioritaire.

Le travail présenté dans ce mémoire s'est basé essentiellement sur :

- Une présentation générale du fonctionnement du réseau électrique
- La modélisation des réseaux électriques de manière adaptée aux études de stabilité statique notamment la modélisation de la machine synchrone qui est le composant principal du réseau électrique.
- L'introduction des différentes formes de stabilité et les méthodes de traitement de chaque forme
- La présentation détaillée de la stabilité statique et de son impact sur le réseau électrique.
- La linéarisation du modèle du système électrique autour du point de fonctionnement.
- L'étude de la réponse du système à des petites perturbations angulaires puis à des petites variations de la puissance.
- L'influence des régulateurs de tension sur l'amortissement des oscillations dans un réseau multimachines

Dans la partie modélisation, nous avons d'abord présenté un modèle électrique et non linéaire de la machine synchrone et des réseaux multimachines puis on a développé le modèle linéarisé et mis sous forme d'état afin de l'adapter aux études de la stabilité statique, on a également modélisé les lignes transport et les transformateurs. Le modèle mécanique a été introduit sous la forme de l'équation du mouvement qu'on a également linéarisé, et c'est la solution de cette équation qui permet d'étudier la stabilité statique et les différents modes d'oscillation.

Dans un premier lieu, on a étudié la stabilité locale en considérant un système constitué d'une machine synchrone reliée à un réseau infini soumise à une petite perturbation afin d'observer sa réponse dans le temps et de tester le modèle linéarisé de la machine

Ensuite, on a généralisé sur un réseau multimachines afin de voir l'influence des paramètres tels que l'amortissement et le régulateur de tension sur la stabilité globale du réseau et de chaque machine individuellement L'analyse des résultats des simulations nous ont permis de voir que l'amortissement contribue de façon significative à amortir les oscillations et donc stabiliser le système, mais comme c'est un paramètre fixe dans la machine synchrone, l'amortissement est insuffisant quand le système fonctionne à la limite de la stabilité.

Les régulateurs de tension agissent en cas de perturbation pour ramener le système à un point de fonctionnement stable.

Les petites perturbations de vitesse et puissances sont très fréquentes dans les réseaux électriques, si elles ne sont pas amorties par des systèmes de stabilisation et les de régulateurs de tension,

alors elles s'amplifient et affectent le régulateur de vitesse et donc dégradent la fréquence du réseau et déclenchant les protections.

Les petites perturbations peuvent à long terme affecter le fonctionnement du réseau, d'où l'utilité des études de la stabilité statique dans la planification à long terme. L'analyse générale du problème de stabilité statique est, bien sûr, plus complexe que ce qui vient d'être exposé, mais nous espérons quand même avoir contribué à montrer l'intérêt d'étudier plus profondément la stabilité statique. Enfin, cette thèse peut être une nouvelle base de départ pour des futures contributions.

Bibliographie

[1] M.Petard; "Généralités sur la protection des réseaux d'énergie électrique"; stage des agents technique du contrôle électrique des réseaux de transport d'énergie; centre de perfectionnement électrique de nanterre; électricité de France; 1961; France.

[2] ROUABHI Adel; TEBBAKH Youb; "Amélioration de la Stabilité Dynamique des Réseaux Electriques par les Algorithmes Génétiques; Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique; école national polytechnique; promotion 2005.

[3] A. Soos; "An Optimal Adaptive Power System Stabilizer"; PHD. Thesis; University Of Calgary; October 1997.

[4] K. Nara; "State of the art of the modern Heuristic Application to Power Systems"; IEEE. PES Winter Meeting January 2000; Vol 2.

[5] Pierre BORNARD; "Conduite d'un système de production-transport "; techniques de l'ingénieur; traité génie électrique; D 4080.

[6] Pierre ESCANÉ; Jean-Marie ESCANÉ; " Réseaux électriques linéaires à constantes réparties"; Techniques de l'ingénieur; D1100.

[7] Hadi Saadat. "Power system analysis".Milwaukee School of Engineering; International Edition 2004;

[8] Jan Machowski; Janusz W bialek; J R Bumby; " power system dynamics : stability and control"; john wiley and sons ltd; second edition 1997 .

[9] Yu Yao-Nan, : "Electric Power System Dynamics", Academic Press 1983.

[10] B. De Metz-Noblat et G. Jeanjean. "Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels". Cahier technique N° 185; groupe Shneider ;janvier 1997

[11] B. Mayer ; M. Jerosilimski et M. Stubbe ; " Outil de Simulation Dynamique des réseaux Electriques" ; Techniques de l'Ingénieur ; D 4120 ; Traité Génie Electrique ; 1980.

[12] M A Pai and Alex Stankovic. "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control". Iowa State University Ames ; Iowa ; U.S.A ; 2006.

[13] Luc Lasne. Les réseaux électriques. Archives Larousse ; Université de Bordeaux 1 ; 26 Fevrier2008.

[14] M. A Tolba ; "Commande des systèmes d'énergie de puissance par des approches heuristiques modernes" ; Thèse de Magister ; Ecole Nationale Polytechnique ; 2004.

[15] P. M. Anderson ; A. FOUAD ; "Power system control and stability" ; the iowa state University Press ; Ames ; IOWA ; USA ; 1977.

[16] P. Kundur : "Power System Stability and Control" ; IPRI Power System Engineering Series ; Ed ; 1993.

[17] Benoît de METZ-NOBLAT ; Gérard JEANJEAN ; "Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels" Cahier Technique Schneider n° 185 ; Collection Technique.

[18] Federico Milano ;"Power System Modelling and Scripting" ;Springer-Verlag London Limited 2010.

[19]Pierre Mayé ; "Aide memoire électrotechnique" ; Dunod ;2006

[20] Pierre BORNARD ; Michel PAVARD ; Georges TESTUD ; " Réseaux d'interconnexion et de transport : réglages et stabilité " Techniques de l'ingénieur ; D4092

[21]Jean-Louis LILIEN ; "Transport et distribution de l'énergie électrique" ; Université de Liège, Faculté des sciences appliquées.

Annexes

Annexe A

Données du réseau IEEE 5

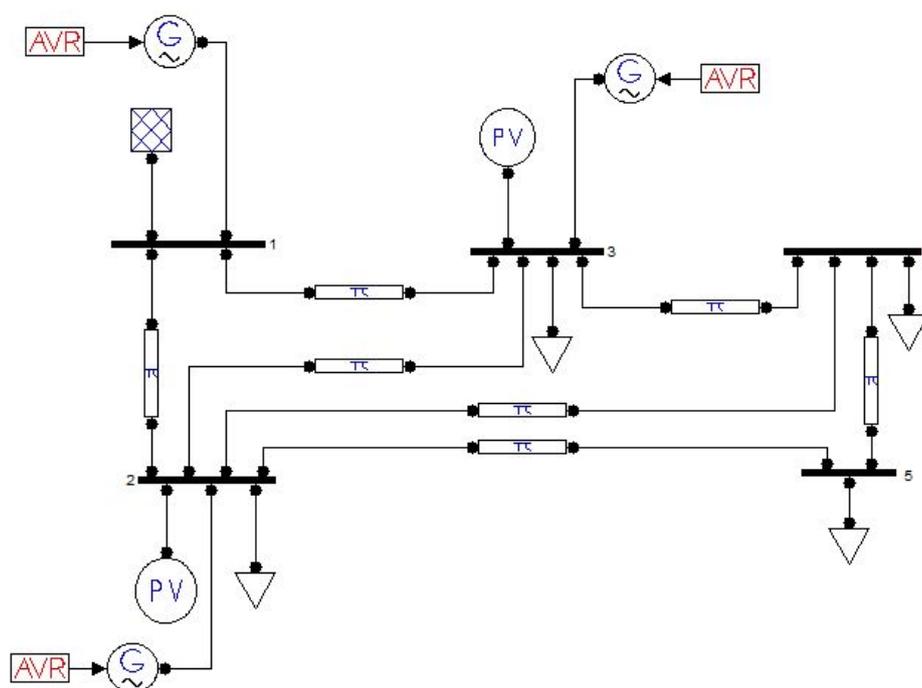


FIGURE 1: Réseau IEEE 5

Données des nœuds

Nœud	Type	Tension [p.u.]	P_d [MW]	Q_d [MVar]	P_g [MW]	Q_{min} [MVar]	Q_{max} [MVar]	Q_{shunt} [MVar]
1	Slack	1.060	0	0	—	-10	50	0
2	PV	1.045	20	10	40	-10	50	0
3	PV	1.030	20	15	30	-10	40	0
4	PQ	1.000	50	30	0	0	0	0
5	PQ	1.000	60	40	0	0	0	0

TABLE 1: Données des nœuds du réseau IEEE5 nœuds

Données des lignes

Ligne	Nœud 1	Nœud 2	R	X	$B_{\frac{1}{2}}$	a
1	1	2	0.02	0.06	0.03	1
2	1	3	0.08	0.24	0.025	1
3	2	3	0.06	0.18	0.020	1
4	2	4	0.06	0.18	0.020	1
5	2	5	0.04	0.12	0.015	1
6	3	4	0.01	0.03	0.010	1
7	4	5	0.08	0.24	0.025	1

TABLE 2: Données des lignes du réseau IEEE 5 nœuds

Annexe B

Présentation de PSAT

PSAT est un outil de simulation des réseaux électriques open source développé pour MATLAB par le Dr. Federico Milano. C'est un outil essentiellement destiné à l'éducation et à la recherche et il offre les mêmes simulations que les logiciels industriels

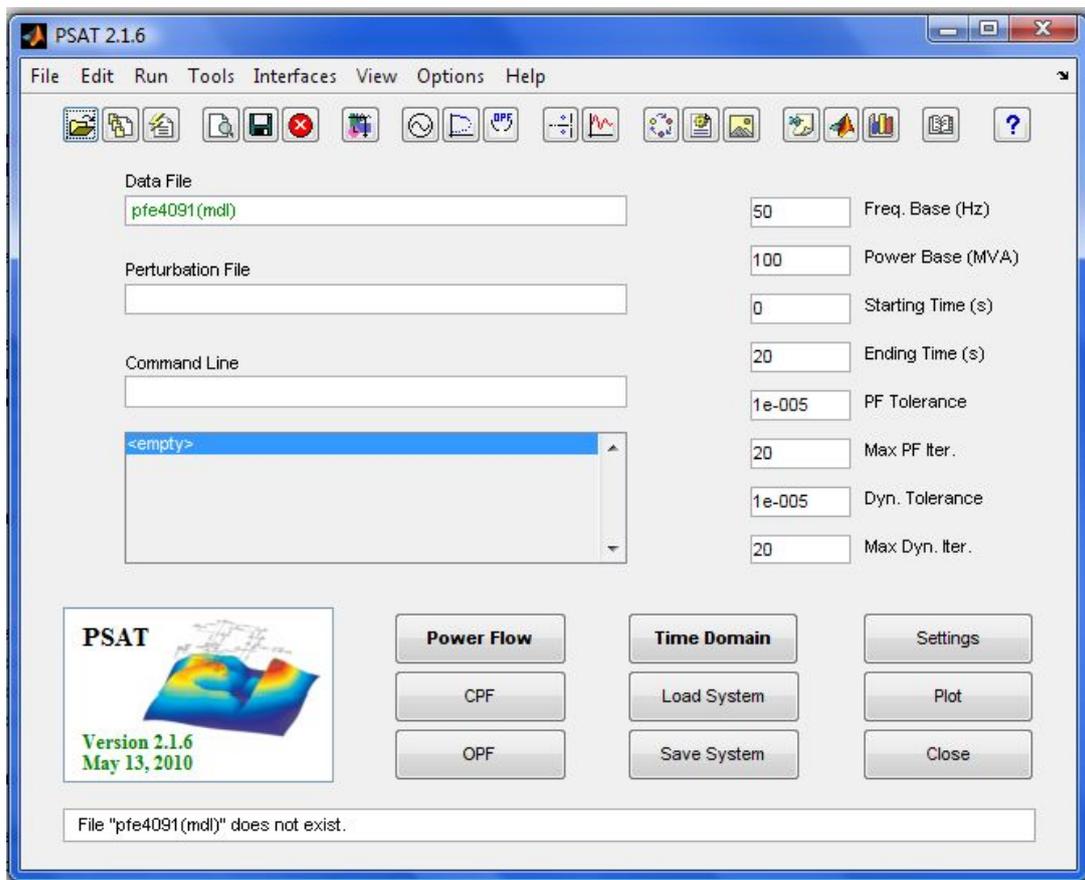


FIGURE 2: Interface de PSAT

PSAT s'exécute sous le mode GUI de MATLAB,

PSAT dispose de sa propre bibliothèque en plus de la bibliothèque de SIMULINK

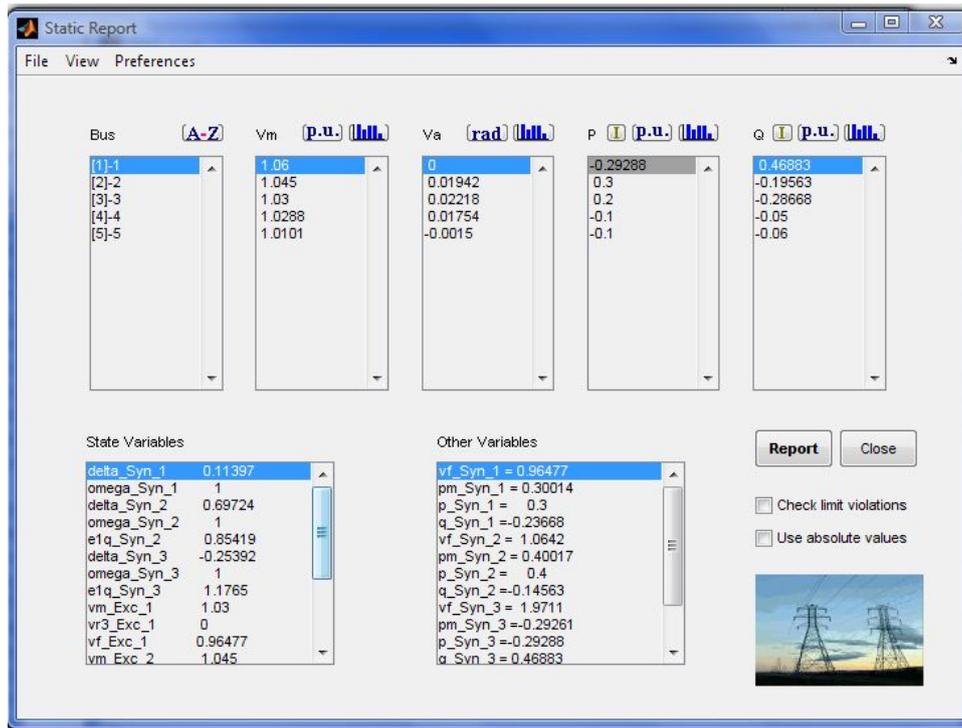


FIGURE 3: Calcul d'écoulements de puissances sous PSAT

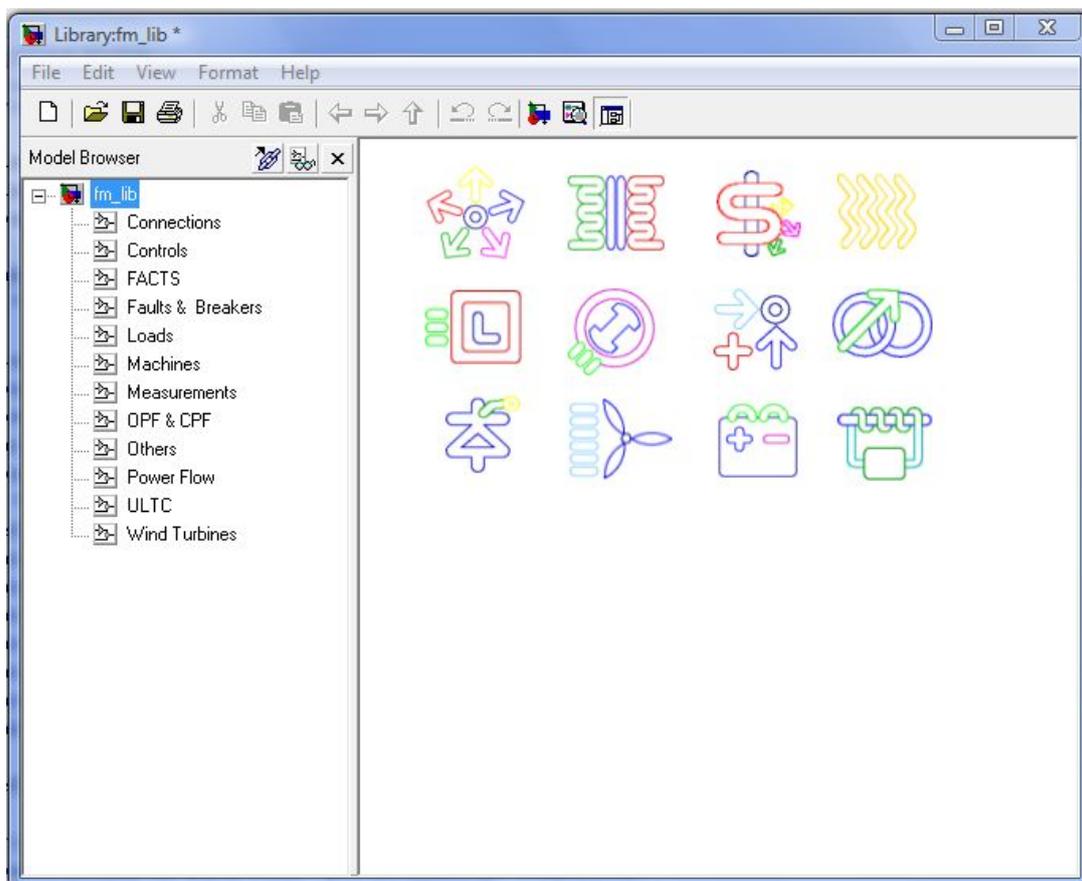


FIGURE 4: Bibliothèque PSAT