

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire Présenté
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie électrique »

Option :

« Electrotechnique »

**Cammande d'un réseau électrique par
mode glissant statique en régime transitoire**

Réalisé par :

- Messas badreddine
- kellil abdeljalil

Encadré par :

M. Bendouha boualem

Année Universitaire 2016/2017

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant, pour la volonté, la santé, la patience qui nous à donner durant tout ces langue années

De façon sincère je tien à remercie :

D'abord mon encadreur monsieur Bendouba Boualem pour son suivi continuel toute au long de ma réalisation de ce modeste travail

Et de sa disponibilité

Mes sincères remerciements vont aussi aux messieurs les jurys d'avoir accepté de lire mon travail

- Fldfdldfdldh
- Fdkhfsd
- dhfdldkfld

Sans oublier de remercie monsieur le chef de département d'électrotechnique et mes enseignants qui nous on contribuer notre formation durant mon parcours.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon père que j'aurais bien aimé qu'il assistera à ma soutenance, mes hélas le bon dieu voulais qu'il soit prêt de lui.

A ma mère qui ma toujours soutenu et encouragé.

A mes sœurs Fella et Manel, le petit Younes.

Mes amis et mes camarades de promotion 2017.

Abdeljalil

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mon père qui ma toujours soutenu.

A ma mère qui ma toujours encouragé.

A mes frères Younes , abdeldjalil, abdelraouf.

A ma fiancée qui ma toujours aider.

Mes amis de travail et tous mes camarades de promotion
2017.

badreddine

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques	
I.1. Introduction	4
I.2. Historique	4
I.2.1. Les premiers réseaux à courant continu	4
I.2.2. La victoire du courant alternatif triphasé.....	5
I.2.3. L'interconnexion progressive des réseaux.....	6
I.2.4. Fréquence des réseaux électriques.....	7
I.3. Généralités sur les réseaux électriques.....	8
I.4. Ecoulement de puissance.....	9
I.4.1. Définition.....	9
I.4.2. Calcul de l'écoulement de puissance.....	9
I.4.3. Technique de calcul de l'écoulement de puissance.....	10
I.4.3.1. Calcul de l'E.P par la méthode de gausse-Seidel.....	10
I.5. Phénomènes dynamique et transitoires.....	11
I.5.1. Classification des phénomènes dynamiques.....	11
I.5.2. Définition des transitoires.....	13
I.5.3. Sources des transitoires.....	14
I.5.3.1. Source extérieures.....	14
I.5.3.1.1. Transitoires dues aux foudres.....	14
I.5.3.1.2 Transitoires dues au court-circuit.....	15
I.5.3.1.3. Transitoires dues aux commutations des capacités.....	15
I.5.3.1.4 .Transitoires de manœuvres dues à l'enclenchement et au réenclench ment des lignes.....	16

Chapitre 2 : Modélisation du réseau Electrique

II.1.Introduction.....	17
II.2.Présentation générale.....	17
II.3.Modélisation.....	18
II .3.1.La machine synchrone.....	18
II.3.2.Lignes de transmission.....	24
II.3.3. régulateurs de tension, stabilisateurs et régulateurs de vitesse.....	28
II.3.4.récapitulatif.....	29
II.4.Stabilité des réseaux électrique.....	30
II.4.1.Introduction.....	30
II.4.2 .Stabilité statique, stabilité dynamique.....	30
II.4.3.Stabilité transitoire.....	31
II.5.simulation.....	31
II.6. Interprétation.....	34
II.6.1. l'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique.....	34
II.6.2. l'effet d'un court-circuit triphasé.....	34
II.7. conclusion.....	34

Chapitre 3 : Linéarisation par bouclage non Linéaire

III .1. Introduction.....	35
III.2. Approche par géométrie différentielle.....	35
III.2.1 .Champs de vecteur.....	35
III.2.2 Dérivée et crochet de Lie.....	35
III.2.3 Détermination du difféomorphisme.....	36

III.3 Système mono-variable.....	37
III.3.1 Détermination du degré relatif.....	37
III.3.2 La forme normale.....	38
III.3.3 dynamique des zéros.....	40
III.3.4 Linéarisation exacte par bouclage.....	41
III.3.5 Calcul de la commande.....	41
III.4. Système Multi-variables.....	42
III.4.1. Degré relatif vectoriel.....	43
III.4.2 .Forme normale.....	45
III.4.3. Calcul de la commande.....	47
III.5 Conclusion.....	49

**Chapitre 4 : THEORIE DES SYSTEMES A STRUCTURE VARIABLE
ET REGLAGE PAR MODE DE GLISSEMENT
MULTIVARIABLE.**

IV.1 Introduction.....	50
IV.2 Le but de régulation d'un réseau électrique.....	50
IV.3 Conception de la commande MGS.....	51
IV.3.1 Surface de glissement.....	53
IV.3.2 Détermination du degré relatif.....	54
IV.4 APPLICATION.....	55
IV.4.1 Simulation de la commande.....	55
IV.4.2 Résultats de simulations.....	57

IV.5. Détermination de la forme normale.....	58
IV.5.1 Détermination de la commande linéarisante.....	59
IV.6. Surface de glissement.....	59
IV.7 Application.....	60
IV.7.1 Simulation avec test de robustesses.....	61
IV.7.2 Résultats de simulation.....	62
Conclusion générale	63

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

Introduction générale

Le transport de l'énergie électrique est réalisé par l'intermédiaire des réseaux dont la taille et la complexité ont augmenté avec l'accroissement des besoins des utilisateurs.

L'augmentation de la demande a poussé aux interconnexions de plusieurs réseaux d'énergie, ce qui a engendré certains avantages, comme l'utilisation optimale des moyens de production, l'assistance mutuelle des réseaux, un bon plan de fréquence, mais aussi d'inconvénients.

Les réseaux deviennent plus grand et plus complexes, ce qui implique que leur étude et analyse deviennent plus difficiles, particulièrement les études de stabilité transitoire.

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

La régulation des réseaux électriques est l'ensemble des moyens mis en œuvre (processus d'asservissement agissant sur un système dynamique) afin de maintenir proches de leurs valeurs de consigne les grandeurs de fréquence et de tension sur l'ensemble du réseau.

La stabilité des réseaux électriques est une qualité de cette régulation par laquelle les situations modérément perturbées reviennent progressivement à un état d'équilibre (stabilité au sens de stabilité asymptotique).

Une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels (côté production, transport, distribution et clients) et ou à la mise hors tension d'une partie ou de l'ensemble du réseau (blackout).

La stabilité réseaux d'énergie électrique est définie comme étant la propriété d'un réseau à demeurer dans un état d'équilibre en fonctionnement normal et à regagner un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis aux perturbations.

La stabilité de l'angle rotorique est la capacité des générateurs synchrones reliés ensemble au réseau de rester dans la synchronisme ; les générateurs synchrones sont des machines utilisées pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La stabilité transitoire du système est définie comme étant la capacité du système à maintenir le synchronisme une fois soumis à de fortes perturbations transitoires telles qu'un défaut sur la ligne de transport, perte de génération, perte de grande charge.

La stabilité transitoire est affectée par les caractéristiques non-linéaires du système et par conséquent un modèle dynamique non-linéaire du système devrait être employé dans l'analyse.

Cette étude traite transitoire des réseaux d'énergie électrique; une méthode de commande est proposée pour stabiliser les générateurs synchrones et pour empêcher la perte de synchronisme entre les générateurs dans un système d'énergie électrique.

Les risques potentiels d'instabilité dans les réseaux électriques DC sont souvent liés aux conséquences des interactions entre les charges, ou encore entre les charges et leurs filtres d'entrée dans l'interface avec les réseaux. Ces dernières interactions ont été mises en évidence dans un cas d'étude de réseau contenant des charges à puissance constante.

Pour pallier à ces problèmes différentes méthodes de commande ont été évaluées afin d'assurer la stabilité du réseau dans tout son domaine de fonctionnement. Afin de valider, et de comparer, les performances des différentes méthodes de commande, un réseau électrique DC a été défini et auquel un cahier des charges a été associé.

Dans cette étude, on propose la linéarisation du système autour d'un point non-linéaire.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre nous présenterons des généralités sur les réseaux d'énergie électrique, ainsi que les notions de base de la stabilité d'un système d'énergie. Une synthèse de différentes méthodes utilisées dans l'évaluation de la stabilité transitoire seront présentées dans cette partie.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons la modélisation du réseau électrique multi-machine non-linéaire, un modèle final est élaboré, en considérant une représentation à deux axes (modèle de Park) pour les machines synchrones associées aux équations algébriques

des connexions. des simulations montrant les réponses du système en boucle ouverte et les effets de l'accroissement de la puissance mécanique, sont présentées à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre traite la théorie technique de la linéarisation du système autour d'un point non-linéaire. ici nous donnons quelques outils de bases concernant la théorie de la géométrie et son application au découplage et à la linéarisation des systèmes non-linéaires.

I.1. Introduction

Un réseau d'énergie électrique sert à transporter l'énergie des centres de production aux centres de consommation, contrairement au début de l'électrification où chaque centre de consommation était alimenté par son propre producteur.

Les réseaux actuels sont de plus en plus interconnectés, et représentent des systèmes dynamique complexes en permanente recherche de point de fonctionnement stable face à des variations continues de la charge .celle-ci, en plus de sa variation normale durant les heures de la journée qui peut également subir des variations brusques et aléatoires, ce qui implique des ajustements nécessaires de production .Notons aussi que ces défaut peuvent se produire , éventuellement accompagnés de mise hors circuit de machines ou d'ouvrages, conduisant, ainsi en cas d'échec à des procédures de ré-enclenchement et à des modifications de la topologie du réseau .

Il en résulte, soit des phénomènes qui varient lentement et que l'on peut classer dans la catégorie de problèmes de régime établi, par conséquent analysés en étudiant la stabilité Statique , soit des phénomènes électromécaniques transitoires qui nécessitent une étude plus poussée et détaillée de la stabilité transitoire.[2]

I.2.Historique

Un réseau électrique étant composé de machines de production et de consommation, ainsi que de structures (lignes, transformateurs) pour les relier, les réseaux électriques ne sont apparus que vers la fin du XIX^e siècle, lorsque chaque élément avait atteint une maturité technologique suffisante.

I.2.1.Les premiers réseaux à courant continu

Lors de la première moitié XIX^e siècle, les inventeurs mettent au point de nombreux types de moteurs électriques à courant continu, mais leur utilisation de manière industrielle ne sera permise qu'après l'invention de la dynamo (génératrice de courant continu) par Zénobi gramme en 1869, qui sera rapidement améliorée.

A l'exposition internationale d'électricité de paris de 1881, marcel Deprez présente pour la première fois une installation de distribution d'énergie électrique alimentée par deux

dynamos. A l'automne 1882, les premiers réseaux électriques apparaissent simultanément à New York et Bellegarde.

Thomas Edison a joué un rôle déterminant dans le développement de l'électricité ; il fonda en 1878 l'Edison Electric Light Co (qui deviendra en 1892 General Electric) , dépose le brevet de l'ampoule électrique en 1879, puis crée le réseau électrique de New York .ce dernier , qui avait essentiellement pour but l'éclairage , se développe rapidement d'une puissance de 1200 ampoules en 1882, il passe à 10000 l'année suivante .ce réseau qui souffre de nombreuses pannes, est constitué de petites centrales électriques (30kw) et d'un réseau de distribution à 110v .il est cependant très limité car l'acheminement de l'électricité n'est possible que sur quelques kilomètres.

A cette période les premières expérimentations de transport de l'énergie électrique se développent et sont menées notamment par Marcel Deprez, qui utilise du courant continu. Ce sont cependant des échecs relatifs car elles ne permettent pas le transport de puissances industrielles (Deprez réussit en 1882 à transporter 400V sur 57 km de distance, mais avec un rendement global de seulement 30%.les ingénieurs Lucien Galard et John Gibbs travaillent quant à eux sur le courant alternatif. Bien que le transformateur soit connu depuis 1837, ils mettent au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant alternatif triphasé, ce qui permet de changer facilement le niveau de tension.la même année, ils démontrent l'intérêt du transformateur en mettant en service une ligne de 80km de long alimentée en courant sous 2000v.

I.2.2.La victoire du courant alternatif triphasé

George Westinghouse, ingénieur et entrepreneur américain qui a créé sa propre compagnie d'électricité, est intéressé par la technologie du courant alternatif .En 1887, il achète le brevet du transformateur de Goulard et embauche Nikola Tesla qui invente l'alternateur triphasé en 1891.cette même année la première installation triphasée est mise en place aux environs de Francfort, avec une ligne de 175km.

Aux Etats-Unis les réseaux en courant continu poursuivent leur développement, mais sont limités en taille ; chaque centrale ne peut alimenter en électricité qu'une zone d'environ 5 Km de diamètre, qui pose problème en dehors des villes.

En parallèle se constituent de petits réseaux urbains en courant alternatif. Une opposition sévère fait rage à cette époque aux Etats-Unis entre Edison (défenseur du courant continu) et George Westinghouse avec Tesla (défenseur du courant alternatif) . Edison insiste notamment sur le risque du courant alternatif en haute tension pour les êtres vivants, allant jusqu'à organiser des démonstrations publiques où il électrocute différents animaux, pour prouver la dangerosité du courant alternatif, et va jusqu'à financer la macabre invention de la chaise électrique. Après l'exécution de William Kemmler, Edison dira : << Il a été Westinghouse >>.

La bataille décisive entre courant continue et alternatif se déroule autour d'un projet d'alimentation électrique de l'industrie de Buffalo par une centrale hydraulique de 75MW située à Niagara Falls , à 32 km de distance .Edison proposait un projet en courant continue tandis que Tesla et Westinghouse proposaient un système en courant alternatif .Le contrat fut donnée à Westinghouse .en 1896, la mise en service de la première ligne industrielle en triphasé fut un succès total et conduit pour un siècle au moins à imposer universellement le courant alternatif triphasé comme moyen de transport de l'énergie électrique , mieux adapté à cette époque au transport sur de longues distances.

Néanmoins, à la fin XX^e siècle, alors que l'interconnexion à échelles pan continentales se développe, les progrès techniques redonnent un intérêt à la courante continue haute tension (CCHT) pour un transport longue distance gaspillant moins d'énergie avec moins de pertes en lignes .C'est par exemple la solution retenue pour le projet Désert, afin de transporter jusqu'en Europe de l'électricité solaire produite en Afrique tropicale.

I.2.3.L'interconnexion progressive des réseaux

L'interconnexion électrique a été progressive. À la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, les usages de l'électricité se multiplient, aussi bien au niveau domestique qu'industriel (notamment l'électrification des tramways, métros et chemins de fer). Dans chaque grande ville s'implantent des compagnies d'électricité. Ces dernières construisent des centrales électriques et de petits réseaux locaux, chacun utilisant des fréquences et des niveaux de tension différents. Les opérateurs se rendent compte tardivement de l'intérêt d'utiliser une fréquence unique (indispensable à l'interconnexion des réseaux), et l'on voit apparaître finalement deux standards de fréquence : le 60 Hz sur la majorité du continent américain et le 50 Hz quasiment partout dans le reste du monde.

Dans la première moitié du XX^e siècle les réseaux urbains des pays industrialisés grandissent pour notamment électrifier les campagnes. Parallèlement, ils s'interconnectent au niveau régional, permettant des économies d'échelle sur la taille des centrales de production et de mieux valoriser des ressources énergétiques géographiquement localisées, comme la production hydraulique essentiellement produite en montagne, loin des grands centres de consommation. Alors qu'augmentaient les puissances appelées et les distances des lignes d'interconnexion, la tension d'exploitation des lignes a aussi augmenté (1^{re} ligne à 220 kV construite en 1923 aux États-Unis, celle à 380 kV en 1930 en Allemagne). L'apparition en 1937 du premier turbo-alternateur refroidi à l'hydrogène, d'une puissance de 100 MW, ouvre la voie des centrales électriques de forte puissance.

Enfin plus récemment, dans le cadre de la construction du marché intérieur de l'électricité, la commission européenne a choisi d'encourager le développement des capacités d'interconnexion transfrontalières, afin d'accroître les potentiels d'échange et l'interconnexion <<commerciale>>des marchés nationaux.

Les réseaux du XXI^e siècle sont confrontés à de nouveaux défis :

- accueillir simultanément, sans diminuer significativement la sûreté et la qualité de fonctionnement du réseau, des unités de production stables et commandables (électricité hydroélectrique ou issue de centrales thermiques) ainsi que sources moins prévisibles et souvent pas ou très peu commandables, comme l'énergie solaire ou l'énergie éolienne. Ces sources d'énergie font dans de nombreux pays développés l'objet de programmes de développement à un rythme soutenu [14].
- Faciliter l'interaction entre les consommateurs et le système électrique notamment pour adapter la demande aux capacités de production lorsque cela est nécessaire.
- Être plus économes en ressources non renouvelables qu'il s'agisse des matériaux pour leur construction et des pertes qu'ils entraînent.
- Accueillir de nouveaux usages comme le véhicule électrique.

À ces sujets, les prospectivistes annoncent un réseau intelligent (*Smart grid*) plus souple et capable de mieux intégrer les sources d'énergies propres et sûres, mais diffuses et non continues telles que l'éolien et le solaire.

I.2.4.Fréquence des réseaux électriques

Choisir la fréquence d'un réseau est déterminant car on ne peut plus revenir en arrière une fois que le réseau a atteint une certaine taille.

Une fréquence élevée est particulièrement intéressante pour les transformateurs, permettant ainsi de réduire leur taille. Les ampoules électriques sont elles aussi mieux adaptées aux fréquences élevées (apparition de clignotements avec des fréquences faibles). D'autres applications, particulièrement celles faisant appel aux inductances (type moteur électrique, ou ligne de transport à grande distance), ont un meilleur rendement avec des fréquences faibles. C'est à la fin du XIX^e siècle que cette question s'est posée, mais la faible dimension des réseaux permettait à cette époque d'ajuster la fréquence en fonction de l'utilisation que l'on devait en faire, et des fréquences de 16 Hz à 133 Hz coexistaient.

C'est Westinghouse, probablement avec les conseils de Tesla, qui imposa progressivement le 60 Hz aux États-Unis. En Europe, après que AEG eut choisi le 50 Hz, cette fréquence se diffusa petit à petit. On conserve aujourd'hui cet historique et les réseaux actuels sont exploités soit à 50 Hz, soit à 60 Hz.

I.3.La structure des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité (charge). Le réseau de transport électrique est divisé en lignes très haute, moyenne et basse tension. La structure des réseaux varie d'un pays à un autre, mais on peut la représenter de la façon générale suivante :

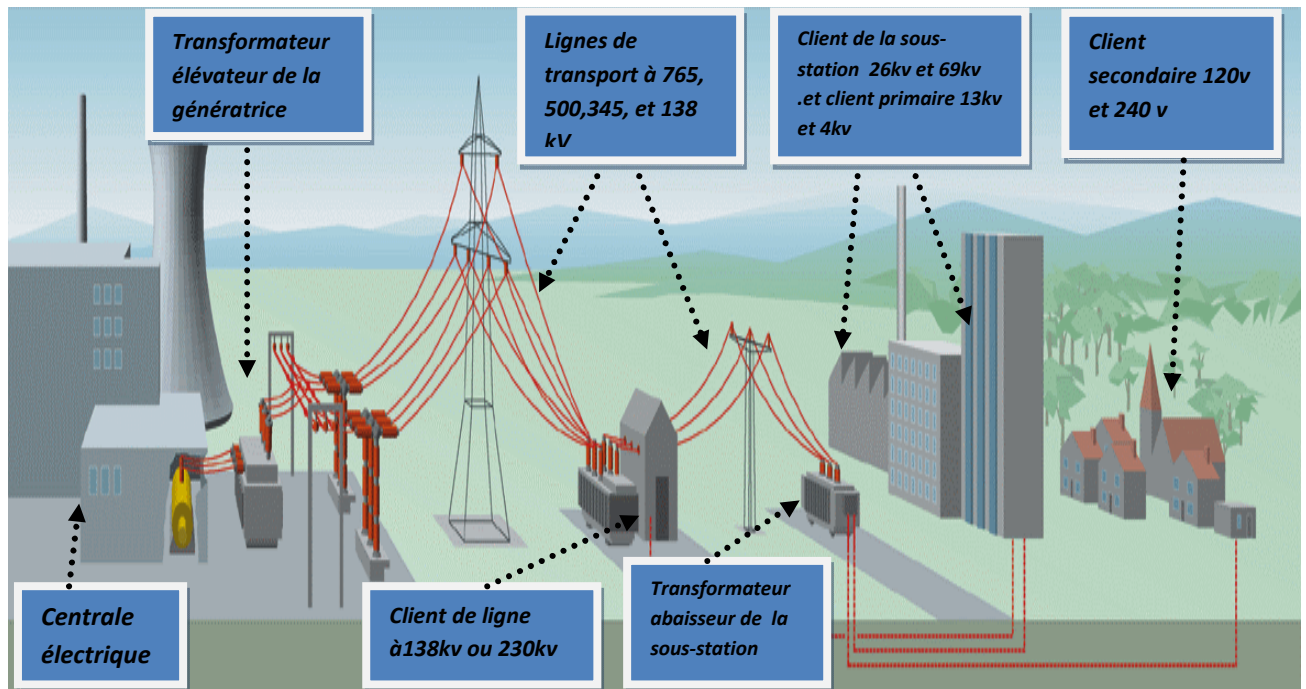


Figure 1.1. structure de base d'un réseau d'énergie électrique

Tout calcul sur un réseau d'énergie électrique démarre à partir d'un point stable, et ceci est assuré par le calcul d'écoulement de puissance.

Sous cette dimension le calcul d'écoulement de puissance a son importance dans toute étude sur un réseau électrique.

I.4. Ecoulement de puissance.

I.4.1. Définition.

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à rechercher un point de fonctionnement stable à un moment donné à travers une information complète du courant et de puissance.

En fait, il s'agit principalement de calculer les quatre paramètres suivants au niveau de chaque nœud de réseau : P , Q , $|v|$ et δ . [2]

En d'autres termes, l'étude de l'écoulement de puissance (Load flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [4]

I.4.2. Calcul de l'écoulement de puissance

Pour chaque type de nœud (quelque soit le type de nœud), on définit la puissance d'injection comme suit :

$$S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (I.1)$$

Sachant que l'on a aussi :

$$S_i = V_i I_i^* \quad (I.2)$$

Alors :

$$I_i = (P_i - jQ_i) / V_i^* \quad (I.3)$$

On suppose préalablement que notre système, à chaque nœud fonctionne sous les conditions suivantes [2] :

On peut conserver l'équilibre total entre l'énergie active produite et demandé en ajoutant les pertes actives (production=charge + (pertes ≈ 5%)).

A l'aide du réglage du courant d'excitation de l'alternateur et par conséquence la force électromotrice dans l'induit, on peut fixer la tension a une valeur déterminée à l'avance.

I.4.3. Technique de calcul d'écoulement de puissance

Il existe plusieurs méthodes de calcul d'écoulement de puissance, mais nous Ne citerons que la méthode de gauss-Seidel.

I.4.3.1. Calcul de l'E.P par la méthode de gauss-Seidel

L'objectif est de déterminer tous les P_i , Q_i , $|V_i|$ et δ_i , pour les n nœuds d'un réseau électrique. la procédure est de calculer les V_i et δ_i des nœuds PQ, ensuite les Q_i et δ_i des nœuds PV et finalement le P et Q du slack bus :

*Nœuds PQ

On détermine les tensions $|V_i|$ et les angles δ_i par la formulation suivante à programmer :

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{y_i} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k-1)}} - \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} V_i - \sum_{l=i+1}^n Y_{il} V_l \right). \quad (\text{I.4})$$

$$V_i^{(k)} = |V_i^{(k)}| \angle \delta_i^{(k)}$$

Avec : $i = n$ (nombre des nœuds P.Q).

* Nœuds PV :

On a à déterminer les Q_i et les δ_i , par les formules suivantes :

$$Q_i^{(k)} = -I_m(V_i^* (\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j)) \quad I_m: \text{imaginaire}$$

$$\delta_i^{(k)} = \text{Arg.} \left[\frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i} - \sum_{j=1}^{j=i} Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \right] \quad (\text{I.5})$$

Tel que :

$$V_i^* = |V_i^{(spe)}| \angle \delta_i^{(k-1)}$$

*Slack bus:

On détermine ici juste P_i et Q_i , à l'ordre K seulement (c.-à-d., à la kième itération) :

$$P_s - jQ_s = V_s^* \sum_{j=1}^n Y_{sj} V_j^{(k)} \quad (\text{I.6})$$

Ensuite, on exécute le test de la convergence pour les amplitudes de tension des nœuds PQ (les amplitudes de tensions des nœuds PV et slack bus étant spécifiées) :

$$||V|^{(k)} - |V|^{(k-1)}| \leq \text{Tol} \quad (\text{I.7})$$

Remarque : Il faut que tous les éléments réalisent cette condition.

- Amélioration de la convergence par relaxation (par facteur d'accélération) :

$$|V_i|_{\text{acc}}^{(k)} = |V_i|^{(k-1)} + \alpha \left(|V_i|^{(k)} - |V_i|^{(k-1)} \right) \quad (\text{I.8})$$

α : Facteur d'accélération, prise généralement entre 1.4 et 1.6.

I.5. Phénomènes dynamiques et transitoires

I.5.1 Classification des Phénomènes dynamiques

Il existe une vaste gamme de phénomènes dynamiques dans les réseaux électrique, qui doivent être pris en compte pour assurer son fonctionnement correct. L'illustration suivante montre une classification fondée sur la nature des phénomènes ainsi que sur les plages temporelles dans ils se manifestent.

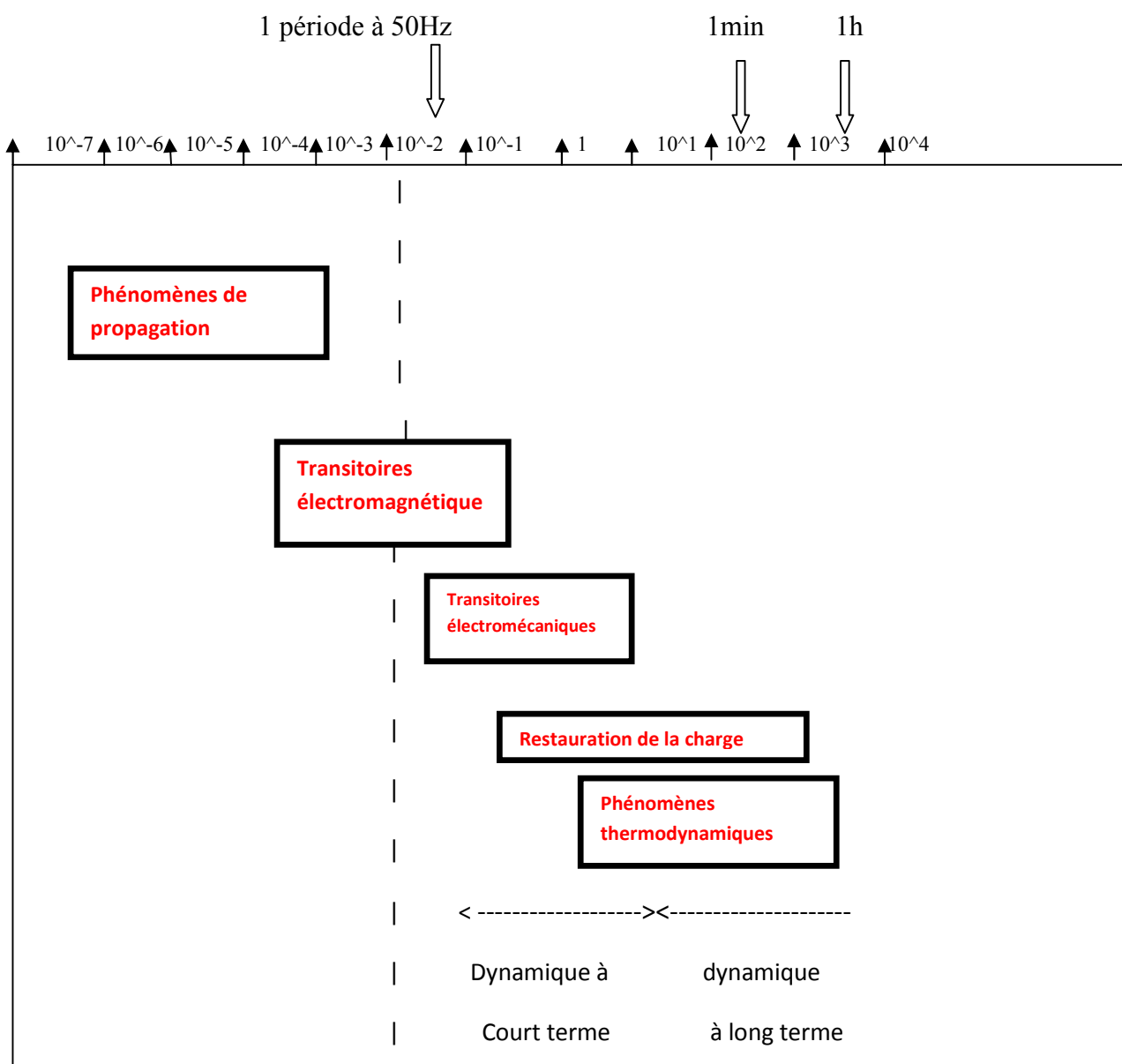


Figure 1.2. Classification des phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques

Les phénomènes les plus rapides sont ceux de propagation. Ils se produisent principalement sur les lignes de transport et correspondent à la propagation des ondes électromagnétiques suite à des coups de foudre ou des opérations de coupure (disjoncteurs).

La gamme de temps de ces phénomènes s'étend de la microseconde à la milliseconde. [7]

Les transitoires électromagnétiques prennent place dans les enroulements des générateurs et des moteurs et dans les dispositifs électroniques de puissance .ils résultent de perturbations (par exemple court-circuit), d'opérations de coupure ou de commutations (thyristors, etc.....).

Ils s'étendent typiquement de quelques millisecondes à quelques dixièmes de seconde, dans un intervalle de temps de cet ordre.il est légitime de considérer que les vitesses de rotation des machines n'ont pas le temps de changer. [5]

Les transitoires électromécaniques sont précisément dues au mouvement des masses tournantes des générateurs et moteurs, ainsi qu'à la réponse des régulateurs de tension et de vitesse, suite à une perturbation et au fonctionnement des protections.

La gamme de temps de ces phénomènes s'étend typiquement de quelques centièmes de seconde à une dizaine de secondes.

Les phénomènes de restauration de la charge s'étendent de quelques dixièmes de seconde à quelques dizaines de minutes.ils correspondent à la tendance des charges à recouvrer la puissance qu'elles consommaient avant perturbation .il s'agit soit d'un comportement intrinsèque de la charge, soit de l'effet d'une régulation.

La dynamique la plus lente est celle des phénomènes thermodynamiques qui se développent dans les chaudières des centrales thermiques, suite à une perturbation de l'équilibre production consommation de puissance .ils peuvent aller de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes

On parle également de :

- Dynamique à court-terme pour désigner les phénomènes qui se manifestent sur une période allant du dixième à la dizaine de secondes, incluant les transitoires électromécaniques et les phénomènes de restauration de la charge les plus rapides.
- Dynamique à long terme pour désigner les phénomènes de restauration de la charge au-delà de la dizaine de secondes ainsi que les phénomènes thermodynamiques. [2,6]

I.5.2 .Définition des transitoires

Tout changement à la configuration d'un circuit exige absolument une condition transitoire. Même si les circuits de distribution d'énergie électrique sont en régime permanent la plupart du temps, les quelques millisecondes transitoires lors de manœuvres ou de coups de foudre introduisent des effets qu'il faut prévoir et contrer par des techniques de protection ou d'atténuation. [7]

Fondamentalement, les transitoires sont des changements momentanés de tension ou de courant qui se produisent sur une très courte période, habituellement évaluée approximativement autour de 1 millisecondes.

I.5.3 Sources des transitoires

Durant leur fonctionnement, des défauts de commutation se produisent fréquemment dans des systèmes de puissance .Différents types de commutation et de défaut peuvent ainsi causer des transitoires.

Ces causes sont ce qu'on appelle sources de transitoires et peuvent être classées en deux catégories :

I.5.3.1 Source extérieures

La foudre est la plus connue des transitoires extérieurement produites. Les grands champs électrique produits pendant une décharge peuvent s'ajouter dans le système de puissance en créant des transitoires induites .une décharge de nuage à nuage peut produire un champ électrique de 70 volt par mètre.

Sur une ligne de transmission d'une longueur de 1/2-mille, la décharge est égale à une transitoire de 56000 volts.

D'autres transitoires extérieurement produites peuvent également être imposées aux lignes électriques par des opérations de service normales.la commutation des charges, ouverture et fermeture des appareillages de coupure sur les lignes activées, commutation de bancs de condensateur, les opérations de ré-fermeture et réglage de rapport de transformation sur des transformateurs peuvent causer des transitoires.

Les mauvais raccordements dans un système de distribution peuvent également produire des transitoires. [7]

I.5.3.1.1 Transitoires dues aux Foudres

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge électrique accompagnée d'une lumière vive (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre). L'éclair est l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges d'origine atmosphérique.

Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique, entre deux nuages où entre la base d'un nuage et le sol, ou à l'intérieur d'un même nuage, dont l'éclair est la manifestation lumineuse.

Les aspérités du sol ou des structures créent un "effet de pointe" qui amplifie de façon très importante le champ électrique local. Cette augmentation du champ électrique se traduit par un effet "corona" – ionisation locale de l'air, un canal d'air relie le nuage au sol permet l'écoulement du coup de foudre. On distingue quatre types caractéristiques de coups de foudre : négatif, positif, descendant et ascendant. En France, 90% des coups de foudre sont négatifs descendant. L'amplitude du courant peut être très forte, variant de 2 000 à 200 000 ampères.

I.5.3.1.2 Transitoires dues au court-circuit

Le défaut le plus fréquent est le court-circuit phase-terre (SLG) qui constitue la majeure partie de tous les défauts dans les lignes de transmission, particulièrement sur les lignes à haute tension. Il peut causer l'augmentation significative de la tension des autres phases dues à l'asymétrie existante d'un système si le neutre n'est pas solidement fondu. Des défauts sont détectés et par conséquent des lignes contrôlées sont coupées lorsqu'un équipement du système est soumis à incident grave. Quand un défaut permanent se produit, le personnel d'entretien de l'entreprise doit réparer la ligne avant de la remettre en service.

L'endroit de défaut est également important pour les défauts transitoires. Il permet la facilité d'intervention au personnel d'entretien pour accomplir leurs tâches.

I.5.3.1.3. Transitoires dues aux commutations des capacités [8]

Les problèmes de qualité de puissance sont devenus une question de souci pour les clients dans le système de puissance, des exemples typiques comprenant des fléchissements de tension et des coupures de commutation de condensateurs. Des condensateurs sont utilisés intensivement dans des systèmes de puissance pour le réglage de la tension et l'amélioration du facteur de puissance. Malheureusement, quand la commutation de condensateur se produit, les transitoires graves peuvent surgir et devenir ainsi une cause principale de perturbation des tensions et des courants.

I.5.3.1.4 .Transitoires de manœuvres dues à l'enclenchement et au réenclenchement des lignes

Ce type de surtensions apparaît lors de la mise sous tension d'une ligne ou lors de la remise sous tension de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut.

Dans le premier cas, les surtensions de manœuvre sont essentiellement dues au phénomène de réflexion d'onde.

Dans le deuxième cas .des phénomènes dues aux charges résiduelles de la ligne peuvent amplifier ces phénomènes de réflexion. [7]

II.1.Introduction

Le réseau électrique est un système dynamique décrit généralement par un modèle mathématique complexe et de dimensions élevées. Dans la plupart des cas, le réseau électrique est caractérisé par plusieurs sous-systèmes géographiquement éloignés.

Les éléments constituant un réseau électrique sont en général :

- Les stations de génération de la puissance électrique.
- Les stations de transformation ou de distribution de l'énergie électrique générée, vers les consommateurs (usines, cités,...).
- Les consommateurs utilisant la puissance électrique dans leur champ de travail.
- Les lignes de transmission, qui acheminent l'énergie électrique vers les consommateurs.

Le réseau électrique est un système fortement interconnecté, qui nécessite un traitement délicat et compliqué aussi bien sur le plan de planification que sur celui de l'optimisation et de la commande.

A cause de la structure interconnectée et l'éloignement géographique des sous-systèmes, la décentralisation du réseau électrique pour l'étude et la conception s'impose.

Le présent chapitre sera consacré à la modélisation du réseau électrique en commençant par une description succincte de son différent composant. Un modèle linéaire assez complet sera obtenu pour l'étude de la stabilité du réseau électrique.

II.2.Présentation générale

La figure(1) montre un type de réseau électrique avec une seule machine. Le générateur est représenté par la source de tension à travers une impédance, connecté aux lignes de transport par un nœud dit (nœud générateur). Les charges, quant à elles, sont présentés par des impédances (cas des charges statiques ou variant peu). Celle-ci sont connectées aux lignes de transmission via les nœuds dits (nœud charges).

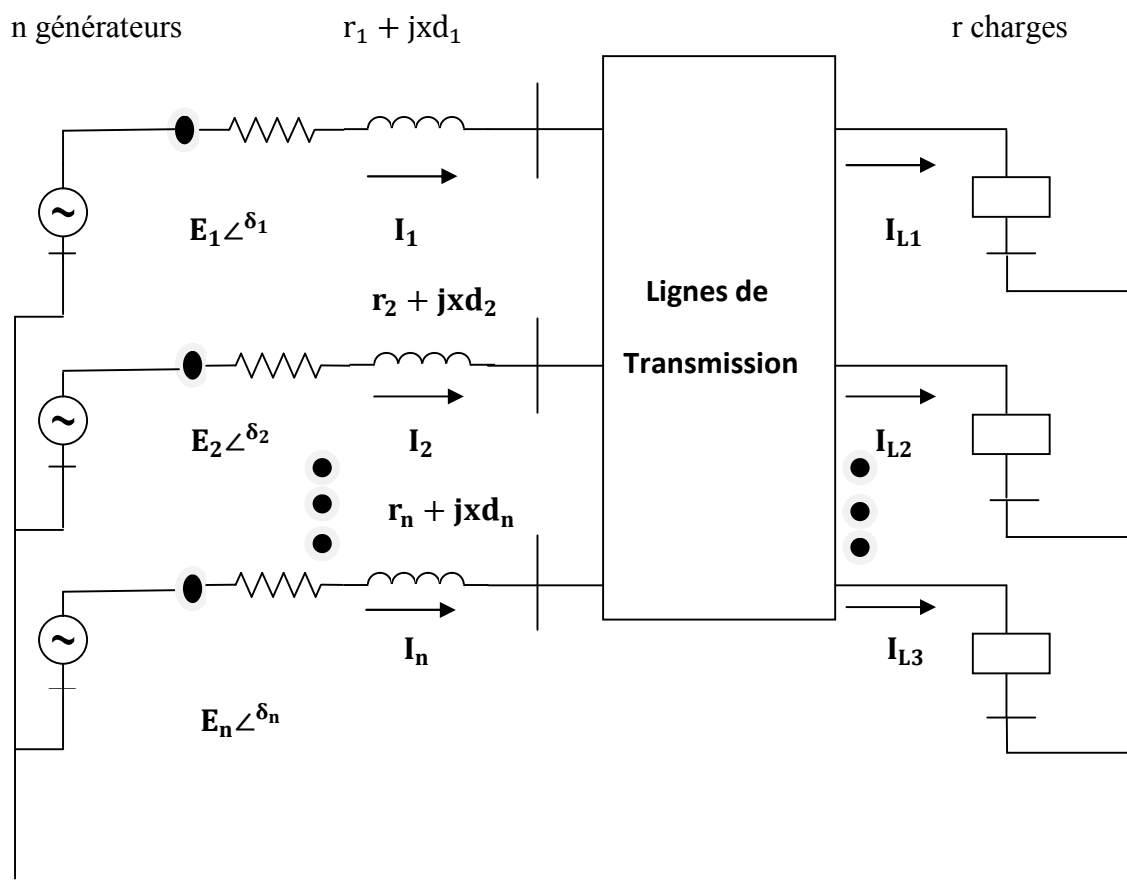


Fig . II.1 :schéma représentatif d'un réseau électrique multi-machines

II.3.Modélisation

Dans cette section, nous allons modéliser quelques constituants des réseaux électrique, à savoir, les générateurs, les lignes de transmission , les chrges , et montrer quelque types de régulateurs utilisés.

II .3.1.La machine synchrone

Une grande partie de l'énergie électrique est produite à l'heure actuelle par les machines synchrones des différentes centrales de production.

Les machines synchrone utilisées pour la génération de l'énergie électrique à partir de la puissance mécanique fournie par des turbines au autres dispositifs. Les machine sunchrone possède deux parties : une partie statique dite stator et une partie tournante dite rotor. Ces parties sont équipée d'un ensemble de bobines bien placées utilisées pour la génération d'un courant électrique de forte puissance à partir d'un champ magnétique et d'une puissance

mécanique fournie. Aussi, l'alternateur peut être vu d'une autre manière, nous constatons bien qu'il comporte une partie mécanique et une partie électrique.

A. Modèle de la partie mécanique

L'équation mécanique de la machine synchrone est bien déterminée. Pour l'obtenir, nous utilisons les trois hypothèses de base suivantes :

- La vitesse du rotor de la machine ne varie pas trop par rapport à celle du synchronisme.
- La puissance mécanique reste constante sans l'action du gouverneur.
- La puissance par le frottement est négligeable.

La première hypothèse permet d'égaliser la puissance mécanique et le couple en grandeurs relatives.

Les courants induits dans les bobines du rotor génèrent un couple qui s'oppose au mouvement relatif du rotor par rapport à la vitesse du synchronisme.

De ces hypothèses, nous pouvons formuler les deux équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$\begin{cases} \delta = \omega - \omega_0 \\ \omega = \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \end{cases}$$

Avec:

δ : L'angle électrique, (angle de charge).

ω : la pulsation instantanée, vitesse instantanée,

$\omega_0 = 2\pi f_0$: la pulsation de base, vitesse de synchronisme

f_0 : La fréquence de base.

H : constante d'inertie électrique.

D : coefficient d'amortissement.

P_m : puissance mécanique

P_e : puissance électrique générée.

B. Modèle de la partie électrique

Le modèle de la partie électrique est trop compliqué à établir à cause de la distribution des effets magnétique dans l'espace et dans le temps. Ceci est du, à la fois, à la rotation du rotor et à la géométrie des bobines et leurs emplacements dans la machines.

- **Transformation de Park**

La transformation de Park simplifie la modélisation des machines à courant alternatif en substituant les enroulements de phases a, b, c, fixés par rapport au stator, par deux enroulement : un enroulement « d » sur l'axe direct et l'autre « q » sur l'axe en quadrature, tournant à la même vitesse que le rotor (repère d, q lié au rotor).

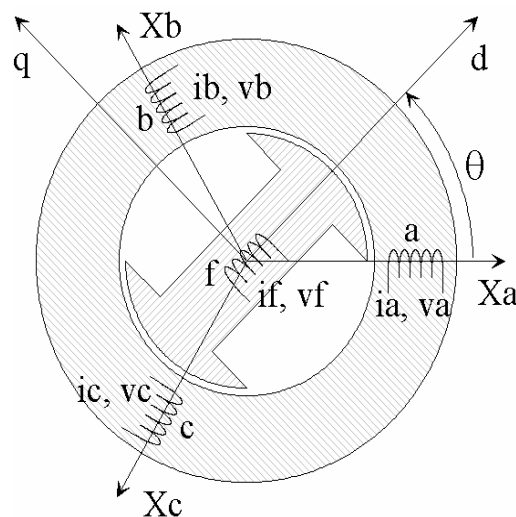


Fig. II.2 : principe de la transformation de Park.

La matrice de transformation de Park s'écrit [10]

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

• Equations électriques de la machine

Appliqué aux équations électriques de la machine, la transformation de Park conduit aux équations suivantes [10].

$$\begin{aligned}
 V_d &= -rI_d - \omega\lambda_q - \frac{d\lambda_d}{dt} \\
 V_q &= -rI_q + \omega\lambda_d - \frac{d\lambda_q}{dt} \\
 V_f &= r_f I_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\
 0 &= r_D I_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\
 0 &= r_Q I_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt}
 \end{aligned} \tag{II.3}$$

Avec :

V_d, V_q et V_f : les tensions aux bornes des enroulements d, q et f.

$\lambda_q, \lambda_d, \lambda_f, \lambda_D, \lambda_Q$: les flux dans les enroulements d, q, f, D et Q.

I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q : les courants dans les enroulements d, q, f, D et Q.

r, r_f, r_D, r_Q : Les résistances des enroulements d, q, f, D et Q.

Les flux $\lambda_q, \lambda_d, \lambda_f, \lambda_D, \lambda_Q$ sont liés aux courants I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & KM_f & KM_D & 0 \\ 0 & L_d & 0 & 0 & KM_Q \\ KM_f & 0 & L_f & M_R & 0 \\ KM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \tag{II.4}$$

L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q : les inductances propres des enroulement d, q, f, D et Q.

M_R : L'inductance mutuelle entre les enroulements f et D. M_f, M_D, M_Q : les inductances mutuelles entre les enroulements statorique et les enroulements rotoriques f, D et Q.

K : coefficient constant induit par la transformation de Park, $K = (2/3)^{1/2}$.

• Hypothèses simplificatrices

Afin de donner un modèle simplifié du générateur, les hypothèses suivantes seront considérées :

- La vitesse du rotor est toujours proche de celle de synchronisme de telle manière qu'elle peut être considérée comme constante.
- Toutes les inductances utilisées sont indépendantes des courants.
- Les inductances des bobines de la machine peuvent être présentées par une constante plus de harmoniques sinusoïdales de l'angle du rotor.
- Les bobines distribuées peuvent être considérées comme concentrées.
- La machine peut être considérée comme une tension avec une impédance.
- Pas de pertes dues à l'hystérésis.
- Les réactances mutuelles existent seulement au niveau du stator.
- L'effet des amortisseurs est négligé.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- Les résistances statoriques sont négligeables.

• Modèle électrique

Nous allons faire un changement de variables qui nous permet d'obtenir les équations électrique de la machine. Ce changement de variable va ramener toutes les grandeurs électriques du rotor au stator.

$$\hat{E}_q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R \frac{KM_f}{L_f} \right] \lambda_f \quad (\text{II. 5})$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R \quad KM_f \quad i_f \right] \quad (\text{II. 6})$$

$$E_{fd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R \quad \frac{KM_f}{r_f} \right] v_f \quad (\text{II. 7})$$

Sous les hypothèses précédentes, nous pouvons obtenir les équations suivantes pour la tension terminale ainsi que pour ses composantes directe et en quadrature :

$$V_q = \dot{E}_q + \dot{X}_d I_q \quad (\text{II. 8})$$

$$V_d = -\dot{X}_d I_d \quad (\text{II. 9})$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (\text{II. 10})$$

Avec :

V_q : Composante de la tension terminale sur l'axe d.

V_d : Composante de la tension terminale sur l'axe q.

I_d : Composante du courant sur l'axe d.

I_q : Composante du courant sur l'axe q.

\dot{X}_d : Réactance transitoire sur l'axe d.

Dans le modèle dynamique de la partie électrique de la machine, nous pouvons prendre plusieurs choix, suivant la considération des régimes transitoires, sub-transitoire et aussi les axes d et q. dans ce qui suit nous allons considérer seulement l'axe d et q et le régime transitoire.

Ce choix réduit le nombre d'équations différentiels de la partie électrique à une seule équation [14], [10].

$$\dot{E}_{qi} = \frac{1}{\tau_{do}} (E_{fd} - \dot{E}_q + (X_d - \dot{X}_d)I_d) \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

E_{fd} : f.e.m d'excitation.

\dot{E}_q : f.e.m transitoire.

X_d : Réactance sur l'axe d. Pour la puissance électrique développée, nous avons plusieurs formules et celle correspondant à notre choix est la suivante :

$$p_e = \dot{E}'_q I_q$$

II.3.2. Lignes de transmission

A. Le repère D-Q

Dans un réseau électrique, les générateurs sont interconnectés via un réseau de ligne de transmission. Afin d'établir les expressions des courants générés, la modélisation de ceux-ci doit être ramenée à un repère D-Q lié au mouvement de l'ensemble des machines qui tournent à la vitesse de synchronisme.

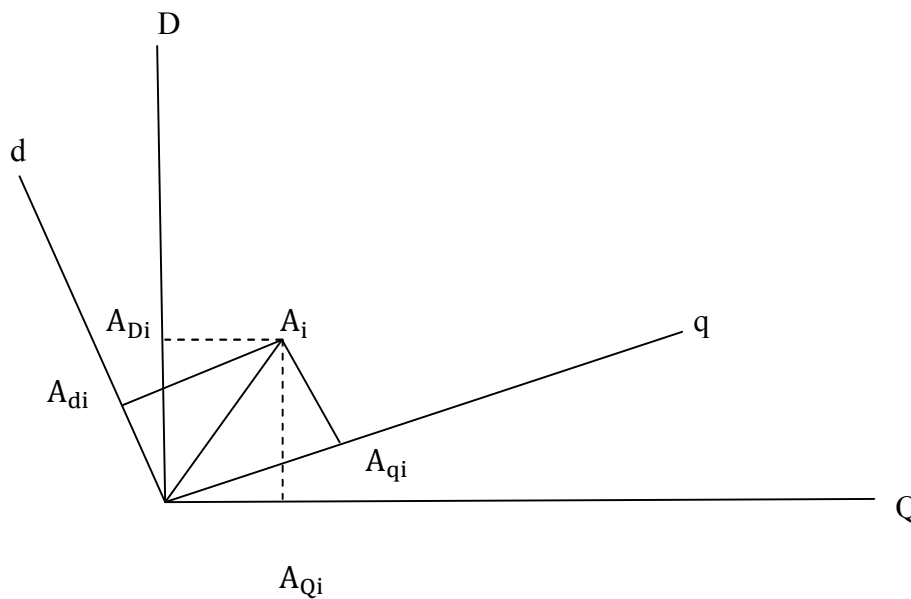


Fig. II.3. Les repères (d-q) et (D-Q).

Le passage d'un repère local (d-q) lié un générateur au repère 5D-Q) se fait par une simple transformation linéaire.

Soit « A_i » une grandeur dans le repère (d-q) i, nous pouvons écrire

$$\bar{A}_i = A_{dqi} = A_{qi} + jA_{di} \quad (\text{II.13})$$

Cette même grandeur, dans le repère D-Q, peut être écrite comme suite

$$\bar{A}_i = A_{DQi} = A_{Qi} + jA_{Di} \quad (\text{II.14})$$

Et l'équation du passage sera

$$\bar{A}_{DQi} = \bar{A}_{dqi} \cdot e^{j\delta i} \quad (\text{II.15})$$

L'application de cette transformation au différents repères (d-q) conduit à la transformation linéaire de la matrice $[T]$ définie par

$$[\bar{A}_{DQ}] = [T] \cdot [\bar{A}_{dq}] \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$[\bar{A}_{dq}] = [\bar{A}_{dq1} \ \dots \ \bar{A}_{dqn}] \quad (\text{II.17})$$

$$[\bar{A}_{DQ}] = [\bar{A}_{DQ1} \ \dots \ \bar{A}_{DQn}] \quad (\text{II.18})$$

Et

$$[T] = [T_{ik}] \quad (\text{II.19})$$

Telle que

$$\begin{cases} T_{ik} = e^{j\delta_i} \\ T_{ki} = 0, \quad \text{pour } i \neq k \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

B. calcul de la matrice admittance

La matrice d'admittance $[Y]$ est calculée suivant les étapes ci-après : [9]

- Les impédances (admittances) équivalentes aux charges sont connectées entre les nœuds de charge et le nœud de référence.
- Des nœuds additionnels sont ajoutés pour les tensions internes des générateurs.
- Les inductances transitoires des générateurs sont connectées entre ces nœuds additionnels et les nœuds terminaux des générateurs.
- Toutes les impédances sont converties en admittances.

Les éléments de la matrice $[Y]$ seront calculés comme suit :

- ✓ Y_{ii} est la somme de toutes les admittances connectées au nœud i .
- ✓ Y_{ij} est l'opposé de l'admittance qui lie le nœud i et le nœud j .

C. calcul de la matrice admittance réduite

Soit le réseau électrique multi-machines comportant n nœuds comportant n nœuds liés aux générateurs et m nœuds lié aux charges. Les courants électriques, au niveau des nœuds, sont liés aux tensions par la formule suivante :

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{V}] \quad (\text{II.21})$$

Décomposons les vecteurs $[\bar{I}]$ et $[\bar{V}]$ en deux sous -vecteurs, les premiers sous-secteurs liés aux nœuds des générateurs, notés $[\bar{I}_G]$ et $[\bar{V}_G]$ et les autres liés aux nœuds des charges, notés

$$[\bar{I}_L] \text{ Et } [\bar{V}_L].$$

Utilisant le fait que les courants injectés aux nœuds des charges sont nuls

$$[\bar{I}] = \begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{0} \end{bmatrix}$$

Nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{GG} & \bar{Y}_{GL} \\ \bar{Y}_{LL} & \bar{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_G \\ \bar{V}_L \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Donc, pour les courants aux nœuds des générateurs, nous pouvons écrire :

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_{GG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad (\text{II.23})$$

Et au niveau des nœuds des charges nous aurons :

$$[\bar{0}] = [\bar{Y}_{LG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{LL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad (\text{II.24})$$

En tirant l'expression à partir de (II.24) et en la substituant dans (II.23), nous obtenons l'expression qui lie les courants et les tensions au niveau des nœuds des générateurs.

$$[\bar{I}_G] = [[\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}]] \cdot [\bar{V}_G] \quad (\text{II.25})$$

La matrice réduite est définie par :

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}] \quad (\text{II.26})$$

D. calcul des courants

De ce qui précède, nous pouvons calculer les courants aux nœuds des générateurs par l'équation matricielle suivante :

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_r] \cdot [\bar{V}_G] \quad (\text{II.27})$$

Le calcul doit être fait dans le repère global (D-Q), puis les résultats seront ramenés aux repères locaux (d-q) i.

Nous trouvons, pour $[\bar{V}_G] = [\dot{E}_q]$ et en négligeant les effets transitoires sur l'axe q, les expressions des composantes d et q des courants au niveau des nœuds des générateurs [14].

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (\text{II.28})$$

$$I_{di} = \sum_{k=0}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (\text{II.29})$$

Avec : $i = 1, \dots, n$

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{ik}]_{\substack{i=1, \dots, n \\ k=1, \dots, n}} \quad (\text{II.30})$$

$$\bar{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\theta_{ik}} \quad (\text{II.31})$$

II.3.3. régulateurs de tension, stabilisateurs et régulateurs de vitesse

Pour la simulation des réseaux électriques en vue de l'évolution de la stabilité transitoire, les différents régulateurs doivent être pris en compte. Les deux régulateurs principaux d'un générateur sont les régulateurs de la tension terminale (AVR : automatique Voltage Régulateur) et les gouverneurs de vitesse. Nous pouvons aussi citer les stabilisateurs qui améliorent la stabilité du réseau électrique.

A. Régulateurs de tension (AVR : Automatique Voltage Régulateur)

Il existe plusieurs types classiques [9], mais ceux-ci sont peu fiables car ils sont dimensionnés en linéarisation au tour d'un point de fonctionnement et une forte perturbation risque de déstabiliser le système.

Le régulateur de la tension terminale génère un signal de commande pour l'appliquer aux bornes du circuit d'excitation de la machine. Ce signal de commande est établi à partir de l'erreur qui existe entre la valeur instantanée de la tension terminale et la valeur de consigne.

D'autres signaux peuvent être utilisés par les régulateurs de la tension terminale. De nouvelles techniques de l'automatique sont actuellement utilisées pour dimensionner des régulateurs de tensions.

B. Stabilisateurs « PSS » (power System Stabiliser)

Les stabilisateurs améliorent la stabilité du réseau électrique en développant une commande à partir du signal de l'erreur de la vitesse, donc de la fréquence. Cette commande est appliquée au circuit d'excitation de la machine. En fait, l'excitation de la machine est la somme de deux commandes : la première due au régulateur de tension, et due au stabilisateur.

L'objectif des stabilisateurs est de ramener la vitesse, donc la fréquence, à sa valeur de synchronisme d'une manière plus rapide que les gouverneurs de vitesse. Ceci est réalisé en utilisant le fait qu'un effet électrique est plus rapide qu'un effet mécanique. D'ailleurs, les nouveaux régulateurs de tension sont équipés de stabilisateurs [9].

C. Gouverneurs (GOV, Governors)

Les gouverneurs qui sont des régulateurs de vitesse, donc de fréquence, agissant sur la puissance mécanique fournie à la machine. Ils sont lents par rapport aux stabilisateurs, de sorte que parfois, la puissance mécanique est considérée comme constante. D'ailleurs, c'est ce qui est généralement considéré pour l'étude effet rapide comme dans le cas de la stabilité transitoire par exemple.

II.3.4. récapitulatif

Soit le réseau électrique à n générateurs. Le modèle non-linéaire est le suivant : [14]

$$\begin{cases} \delta_i = \omega_i - \omega_0 \\ \omega_i = -\frac{1}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(Pm_i - Pe_i) \\ \dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{doi}}(E_{fi} - \dot{E}_{qi} + (x_d - \dot{x}_d)I_d) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (\text{II.33})$$

$$I_{di} = \sum_{k=0}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (\text{II.34})$$

$$P_e = \dot{E}_q I_q \quad (\text{II.35})$$

$$V_{qi} = \dot{E}_{qi} + \dot{x}_{di} I_{di} \quad (\text{II.36})$$

$$V_{di} = -\dot{x}_{di} I_{di} \quad (\text{II.37})$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad (\text{II.38})$$

Avec $i=1, \dots, n$, le numéro du générateur

II.4. Stabilité des réseaux électrique

II.4.1. Introduction

La stabilité d'un réseau d'énergie électrique est définie comme étant l'aptitude de celui-ci à fonctionner au voisinage du synchronisme lorsqu'il est sollicité par une ou plusieurs perturbations [10].

La perturbation crée déséquilibre entre la production et la consommation dans le réseau électrique. Ce déséquilibre induit la variation de l'énergie cinétique provoquant ainsi l'évolution des angles rotoriques accompagnées par des oscillations dynamiques.

Les perturbations sont causées par des défauts qui surviennent sur le réseau électrique. Parmi ces défauts, nous pouvons citer : les court-circuit mono ou polyphasés, suivis généralement d'ouverture de lignes ; les modifications de charges ; la rupture d'une interconnexion et le déclenchement accidentel d'une machine ou d'un transformateur. Les défauts peuvent être classés par leur rapidité et par leur amplitude.

Le but de cette partie est de montrer les différents types de stabilité rencontrés dans les réseaux électriques. La stabilité statique et la stabilité dynamique sont traitées brièvement et l'accent est mis sur la stabilité transitoire.

II.4.2. Stabilité statique, stabilité dynamique

A. Stabilité statique

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique sujet à une perturbation lente et de faible amplitude.

Le système reste stable sous l'action des dispositifs de régulation conventionnels.

L'utilisation d'un modèle linéaire pour l'étude de ce type de stabilité et pour le dimensionnement des régulateurs est suffisant.

B. Stabilité dynamique

Dans ce cas le réseau électrique est sujet à une perturbation rapide mais de faible amplitude. L'utilisation d'un modèle linéaire est acceptable et le système est stabilisé par des dispositifs de commande supplémentaires (stabilisateurs).

II.4.3. Stabilité transitoire

Définition :

La stabilité transitoire correspond à la stabilité d'un réseau électrique siège d'une perturbation rapide et sévère. Cette perturbation allant, le plus souvent, jusqu'à dépasser la capacité des dispositifs de commande. L'utilisation d'un modèle non-linéaire du réseau électrique est nécessaire pour l'évaluation de la stabilité transitoire.

Pour la stabilisation du réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser des régulateurs non-linéaires ainsi que d'autres dispositions particulières.

L'étude de la transitoire.

Pour étudier la stabilité transitoire, il faut :

- Etablir le modèle non-linéaire du système,
- Trouver l'écoulement de l'énergie (généralement donné),
- Trouver le régime établi (le point de fonctionnement),
- Connaître les paramètres nécessaires :
 - La constante d'inertie H ,
 - Les réactances transitoires x_d ,
 - Les impédances des lignes de transmission avant, pendant et après le défaut,
 - La matrice réduite $[Y_r]$ pour chaque cas,
 - La durée du défaut,
 - L'instant d'ouverture de ligne pour un court-circuit,
 - L'instant de la fermeture de ligne pour un court-circuit

II.5.simulation

Dans notre application nous allons utiliser un réseau électrique, dans le premier cas il est constitué d'une machine reliée à un bus infini,

Générateur

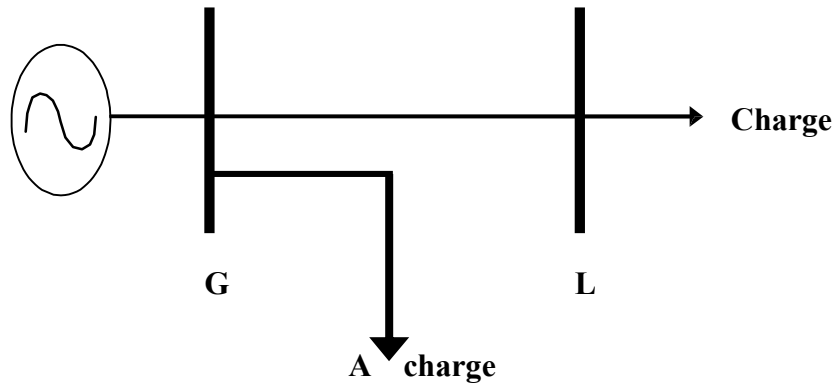


Figure.II.4 : Topologie du réseau électrique à une machine

Nous avons choisis deux défauts pour tester la stabilité des réseaux électriques ; le premier est un accroissement brutal de la valeur de la puissance mécanique fournie à une des machines constituant le réseau électrique et l'autre un court – circuit triphasé.

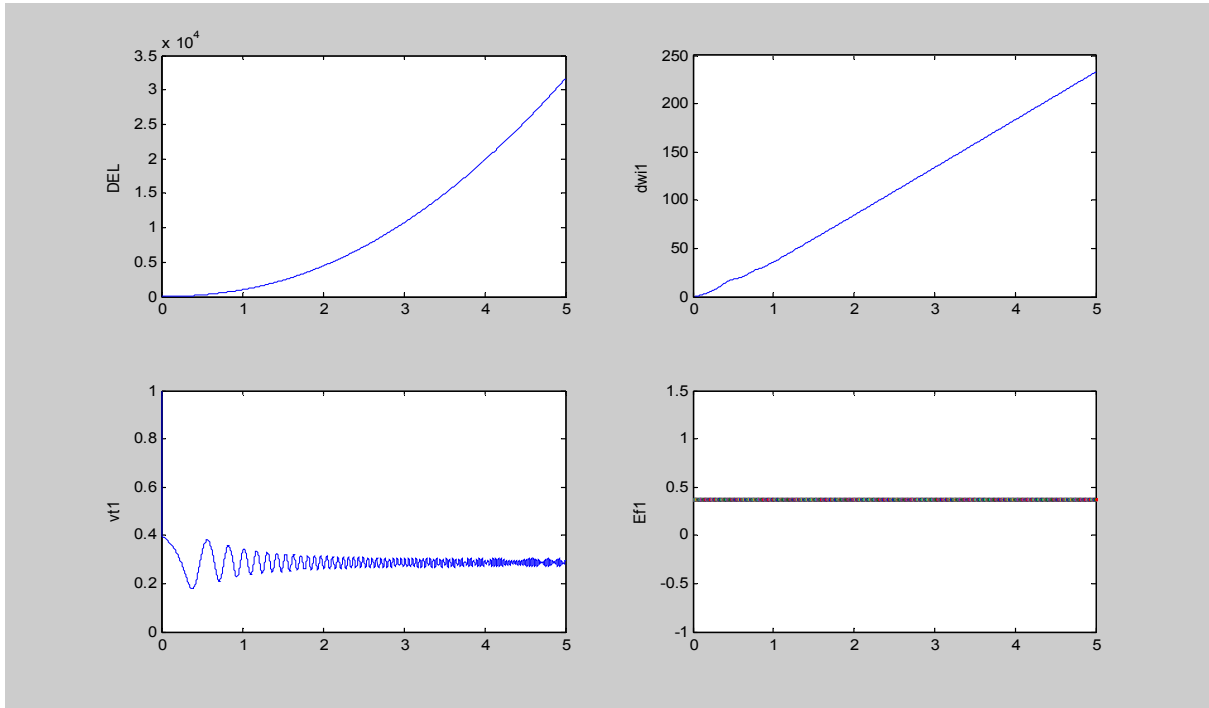


Fig. II.1: Réponse du système à une machine avec une augmentation de 20% de la puissance mécanique sans réglage

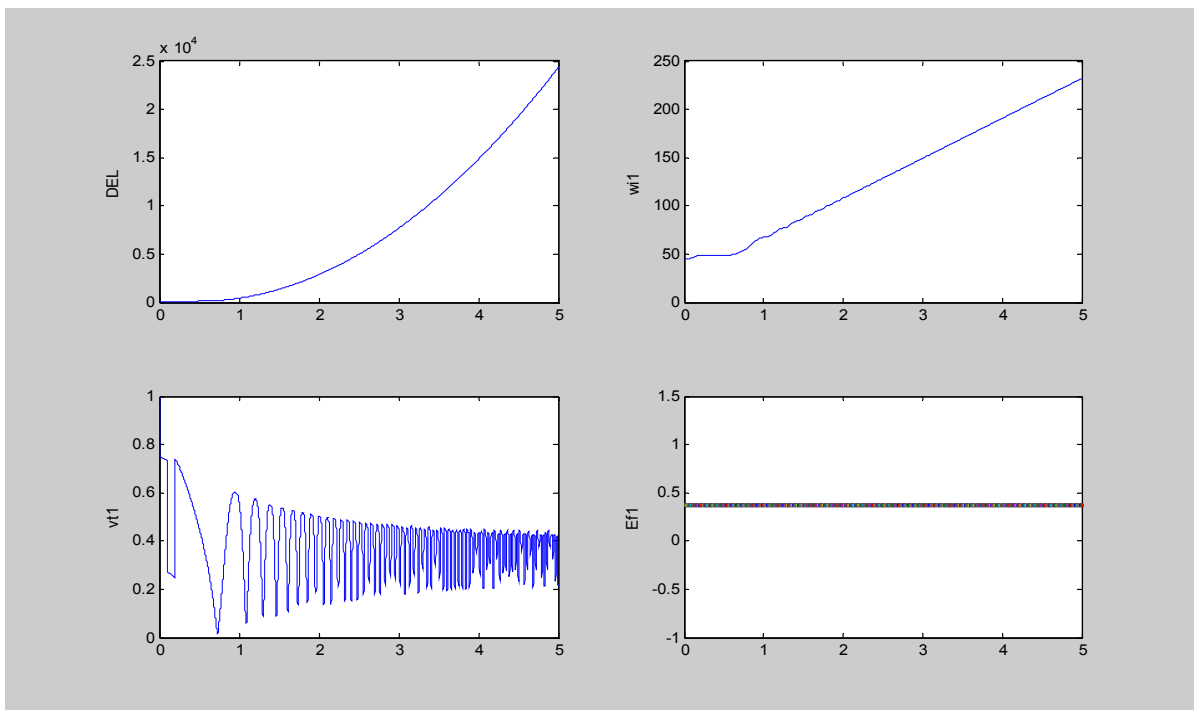


Fig. II.2 : Réponse du système à une machine avec court-circuit sans réglage.

II.6. Interprétation

II.6.1. l'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique

Un accroissement brutal 20% de la puissance mécanique fournie à la machine est appliqué à l'instant $t = 0.1$ (s) et demeure à cette valeur.

La figure (II.5) pour le système à une machine, montrent que le système se déstabilise sous l'effet de ce défaut, et le point de fonctionnement change.

II.6.2. l'effet d'un court-circuit triphasé

Un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t = 0.1$ (s) sur la ligne liant la machine au nœud infini.

La figure (II.6) montre que le système se déstabilise sous l'effet de ce défaut.

II.7. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments nécessaires pour notre travail. Dans la modélisation du réseau électrique, l'accent est mis sur le modèle non linéaire des machines qui permet l'évaluation de la stabilité transitoire.

Dans l'étude de la stabilité, nous avons vu les différents types de stabilité rencontrés

Dans le réseau électrique et nous avons insisté sur la stabilité transitoire dont les étapes de son évaluation ont été données.

La simulation a montré l'effet d'un court-circuit triphasé et aussi l'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique fournie à une machine et nous avons vu qu'un réglage est nécessaire pour maintenir la tension terminale à sa valeur de consigne et aussi pour garantir la stabilité des réseaux électriques.

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons quelques concepts de base sur la théorie de la linéarisation par bouclage non linéaire, ainsi que les outils de base concernant la théorie de la géométrie différentielle et son application au découplage et à la linéarisation des systèmes non linéaire. [15],[16].

Dans ce qui suit, nous considérons aussi bien les systèmes mono entrée-mono sortie que Les systèmes multi entrées multi sorties, Dans les deux cas nous allons détailler la relation entre le degré relatif d'un système et la forme normale. Ainsi que la méthode de calcul de la loi du bouclage linéarisation.

III.2. Approche par géométrie différentielle

III.2.1 .Champs de vecteur

Soit le système non linéaire défini par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Les champs de vecteurs f et g associés au système précédant sont donnés par :

$$f = \sum_{i=1}^N f_i \frac{\partial}{\partial x_i}$$

$$g = \sum_{i=1}^N g_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (\text{III.2})$$

III.2.2 Dérivée et crochet de Lie

Soit $h : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ est une fonction scalaire différentiable et $f : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$ un champ de vecteur.

On appelle dérivée de Lie de h associée à f évaluée au point $x = x_0$, le nouveau champ de vecteur noté $L_f h|_{x_0}$ défini par

$$L_f h(x) \Big|_{x_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h}{\partial x_i} f_i \Big|_{x_0} \quad (\text{III .3})$$

Successivement, on obtient :

$$\begin{aligned} L_f^k h(x) &= L_f (L_f^{k-1} h(x)) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (L_f^{k-1} (Lh(x))) \end{aligned} \quad (\text{III .4})$$

$$\text{Avec : } L_f^0 h(x) = h(x) \quad (\text{III.5})$$

Si f et g sont les dérivée des champs de vecteurs sur \mathfrak{R}^m .

Le croche de Lie est notés $(ad_f g(x))$ ou $[f, g]$ est défini par

$$\begin{aligned} ad_f^0 g(x) = [f, g] &= \frac{\partial g}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g \\ &= L_f L_g - L_g L_f \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Successivement, on obtient :

$$ad_f^k g(x) = [f, ad_f^{k-1} g(x)] \quad \text{Pour } k \geq 1 \quad (\text{III .7})$$

$$\text{Avec : } ad_f^0 g(x) = g(x) \quad (\text{III .8})$$

III.2.3 Détermination du difféomorphisme

On appel $z = \Phi(x)$ un difféomorphisme si $\Phi(x)$ est inversible et les fonctions vectorielles $\Phi(x)$ et $\Phi(x)^{-1}$ sont continûment dérivable, sa garantie le passage entre

$\Phi(x) \rightarrow Z$ et verse versa. [15]

$$\Phi(x) = \begin{pmatrix} \phi_1(x_1 \dots x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_n(x_1 \dots x_n) \end{pmatrix} \quad (\text{III .9})$$

Et que le Jacobien de $\phi(x)$ est non singulier.

Défini par :

$$\frac{d\phi}{dx} = \begin{bmatrix} \frac{d\phi_1}{dx_1} & \dots & \frac{d\phi_1}{dx_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{d\phi_n}{dx_1} & \dots & \frac{d\phi_n}{dx_n} \end{bmatrix} \quad (\text{III .10})$$

III.3 Système mono-variable

Considérons le système non linéaire défini par les équations dynamiques suivantes :

$$\sum \begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III .11})$$

Avec :

u : entrée du système (commande) $u \in \mathfrak{R}$

y : sortie du système. $y \in \mathfrak{R}$

x : état du système $x \in \mathfrak{R}^n$

Et f, g, h sont des fonctions analytiques et vectorielles de dimensions appropriées.

III.3.1 Détermination du degré relatif

Définition (1) : [15]

Le système (III.11) à un degré relatif r_i en $x = x_0$ si

$L_g L_f^k h(x) = 0$ Pour tous les $K < r - 1$ et x voisin de x_0

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \Big|_{x=x_0} \neq 0 \quad (\text{III .12})$$

Le degré relatif d'un système représente de façon générale le nombre de fois qu'on dérive la sortie du système jusqu'à ce que la commande apparaisse explicitement.

$$\dot{y} = L_f h(x) + L_g h(x)u \quad (\text{III .13})$$

Si $L_g h(x)|_{x=x_0} \neq 0$ alors $r = 1$, sinon on dérive encore une fois

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + (L_g L_f h(x))u \quad (\text{III .14})$$

Si $L_g L_f h(x)|_{x=x_0} \neq 0$ alors $r = 2$, si non on continue l'étape de dérivation

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + (L_g L_f^{r-1} h(x))u \quad (\text{III .15})$$

Avec

$$L_g L_f^{r-1} h(x)|_{x=x_0} \neq 0 \quad (\text{III.16})$$

III.3.2 La forme normale [13]

Rappelons le système Σ non linéaire (III .11) :

Le difféomorphisme est écrit par :

$$\begin{cases} Z_1 = h(x) = \phi_1(x) \\ Z_2 = L_f h(x) = \phi_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_r = L_f^{r-1} h(x) = \phi_r(x) \end{cases} \quad (\text{III .17})$$

En choisissant $(n-r)$ fonction $\phi_{r+1}, \dots, \phi_n$ telles que l'application $\phi(x) = (\phi_1(x), \dots, \phi_n(x))$

Soit un difféomorphisme. Dans la nouvelle base le système s'écrit sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = L_f h(x) = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = L_f^2 h(x) = Z_3 \\ \vdots \\ \dot{Z}_r = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u = b(Z) + a(Z) u \\ \dot{Z}_{r+1} = L_f \phi_{r+1}(x) + L_g \phi_{r+1}(x) u = q_{r+1}(Z) + p_{r+1}(Z) u \\ \vdots \\ \dot{Z}_n = q_n(Z) + p_n(Z) u \end{array} \right. \quad (\text{III .18})$$

Remarque

Dans le cas mono entrée-mono sortie, on peut toujours choisir les (n-r) fonction

$\phi_{r+1} \dots \phi_n$ De telle manière que $L_g \phi_i(x) = 0$ pour $r+1 \leq i \leq n$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = Z_3 \\ \vdots \\ \dot{Z}_r = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u \\ \dot{Z}_{r+1} = q_{r+1}(Z) \\ \vdots \\ \dot{Z}_n = q_n(Z) \end{array} \right. \quad (\text{III .19})$$

Cette forme est appelée la forme normale.

Remarque

Dans le cas $r = n$ on parle de linéarisation exacte entrée-sortie. Par conséquent la dynamique des zéros disparaît.

III.3.3 dynamique des zéros

En posant :

$$\xi = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_r \end{pmatrix}, \quad \eta = \begin{pmatrix} Z_{r+1} \\ Z_{r+2} \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n \end{pmatrix} \quad (\text{III .20})$$

Le système Σ dans sa forme normale, peut s'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = Z_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{Z}_r = b(\xi) + a(\xi)u \\ \dot{\eta} = q(\xi, \eta) \end{array} \right. \quad (\text{III .21})$$

En ce qui concerne l'état $\eta(t)$ on voit que si $\eta(0)$ et $\xi(0)$, alors $\eta(t)$ sera la solution de l'équation différentielle

$$\dot{\eta} = q(0, \eta(t)) \quad (\text{III .22})$$

Cette dynamique représente la dynamique interne du système non commandé qui s'appelle dynamique des zéros, il est important que cette dynamique soit stable.

Remarque

Si la dynamique des zéros est asymptotiquement stable alors on dit que le système est à minimum de phase.

III.3.4 Linéarisation exacte par bouclage

Pour un système ayant un degré relatif $r = n$ c.à.d. Complètement linéarisable, la forme Normale de ce système est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = L_f h(x) = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = L_f^2 h(x) = Z_3 \\ \vdots \\ \dot{Z}_{n-1} = L_f^{n-1} h(x) = Z_n \\ \dot{Z}_n = L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x)u = b(Z) + a(Z)u \end{array} \right. \quad (\text{III .23})$$

III.3.5 Calcul de la commande

La nouvelle commande dans cette espace (Z) est :

$$v = b(Z) + a(Z)u \quad (\text{III .24})$$

Implique une loi de commande comme suit :

$$u = \frac{1}{a(Z)}(-b(Z) + v) \quad (\text{III .25})$$

Le système va être décrit dans l'espace (Z) par la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = Z_3 \\ \vdots \\ \dot{Z}_{n-1} = Z_n \\ \dot{Z}_n = v \end{array} \right. \quad (\text{III .26})$$

Cette forme représente la forme canonique de « Brunowsky » c'est une forme linéaire et Commandable.

Finalement le bouclage qui linéarise exactement le système est donnée par

$$u = a(x)^{-1}(-b(x) + v) \quad (\text{III.27})$$

$$\dot{Z} = AZ + bv \quad (\text{III.28})$$

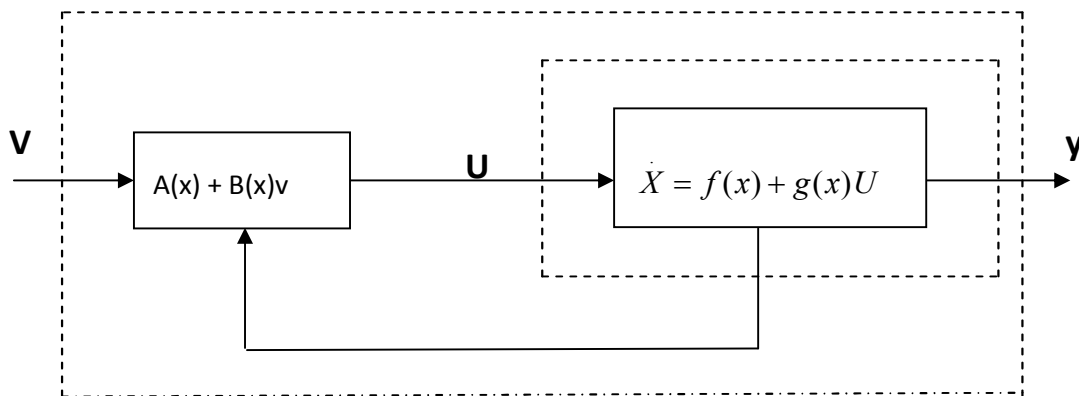


Fig. III.1 bouclage linéarisant

III.4. Système Multi-variables

Dans ce cas, les résultats obtenus précédemment dans le cas mono entrée-mono sortie peuvent être appliqués, pour les systèmes carrés $m = p$ c.-à-d. le nombre d'entrées égal au nombre de sorties du système. Cette condition nous a conduit à introduire une nouvelle notion « la notion de découplage » entre les sorties et les nouvelles entrées du système. [15]

En considérant le système non linéaire carré suivant :

$$\sum \begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

x : états du système

U : vecteur de commande

Y : vecteur de sortie du système

$$x \in \mathfrak{R}^m, u \in \mathfrak{R}^p, y \in \mathfrak{R}^p$$

Ou :

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1p} \\ g_{21} \\ \vdots \\ g_{m1} & \dots & \dots & g_{mp} \end{bmatrix} = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_p]$$

$$h(x) = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ \vdots \\ h_p(x) \end{pmatrix}, \quad y(x) = \begin{pmatrix} y_1(x) \\ \vdots \\ y_p(x) \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{pmatrix}$$

$$g(x)u = \sum_{i=1}^p g_i u_i$$

III.4.1. Degré relatif vectoriel

Définition (2) : le système a un degré relatif vectoriel $r_1 \dots r_m$ au point x_0 si

$$L_{g_j} L_f^k h_i(x) = 0 \quad 1 \leq j \leq m \quad 1 \leq i \leq m \quad \text{Pour tous les } k \leq r$$

Le degré relatif pour la première sortie y_1

$$y_1 = h_1(x)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{\partial h_1}{\partial x} \left(f(x) + \sum_{i=1}^p g_i u_i \right) \tag{III .30}$$

$$= L_f h_1(x) + \sum_{i=1}^p L_{g_i} h_1(x) u_i$$

Le degré relatif $r > 1$ alors $L_{g_i} h_1(x) = 0$

$$\dot{y}_1 = L_f h_1(x)$$

$$\ddot{y}_1 = \frac{\partial}{\partial x} (L_f h_1) (f + \sum_{i=1}^p g_i u_i) \quad (\text{III .31})$$

$$= L_f^2 h(x) + \sum_{i=1}^p L_{g_i} L_f h_1(x) u_i$$

$$\text{Si } r > 2 \Rightarrow L_{g_i} L_f h_1(x) = 0$$

Aussi pour un degré relatif égal à r_1

$$y_1^{(r_1)} = L_f^{r_1} h_1(x) + \sum L_g L_f^{r_1-1} h_1(x) u_i \quad (\text{III .32})$$

Avec $L_g L_f^{r_1-1} h_1(x) \neq 0$.

Avec la même procédure que celle ci dessus et pour un degré relatif égal à r_2 (la deuxième sortie v_2)

On obtient :

$$y_1^{(r_2)} = L_f^{r_2} h_2(x) + \sum_{i=1}^p L_g L_f^{r_2-1} h_2(x) u_i \quad (\text{III .33})$$

Successivement :

$$y_p^{(r_p)} = L_f^{r_p} h_p(x) + \sum_{i=1}^p L_g L_f^{r_p-1} h_p(x) u_i \quad (\text{III .34})$$

$$\begin{pmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \vdots \\ y_p^{(r_p)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1 \\ L_f^{r_2} h_2 \\ \vdots \\ L_f^{r_p} h_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^p L_{g_i} L_f^{r_1-1} h_1 u_i \\ \sum_{i=1}^p L_{g_i} L_f^{r_2-1} h_2 u_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p L_{g_i} L_f^{r_p-1} h_p u_i \end{pmatrix} \quad (\text{III .35})$$

$$= \begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1 \\ L_f^{r_2} h_2 \\ \vdots \\ L_f^{r_p} h_p \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1 \cdots L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1 \\ L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2 \cdots L_{g_p} L_f^{r_2-1} h_2 \\ \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p \cdots L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p \end{bmatrix}}_{\Omega(x)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} \quad (\text{III .36})$$

Et la matrice de découplage $\Omega(x)$ est non singulière au point $x = x_0$.

$$\Omega(x) = \begin{pmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) \cdots L_{g_p} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p(x) \cdots L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_m(x) \end{pmatrix} \quad (\text{III .37})$$

Remarque

Si $r_1 + \cdots + r_m = n$ (le nombre des états) alors le système est exactement linéarisable, ce que signifie qu'après le difféomorphisme et le découplage, le système ne sera composé que de m sous système linéaire découplés.

III.4.2 .Forme normale

Pour trouve la forme normale qui correspond au système Σ , on définit les nouvelles variables.

Z_1, \dots, Z_r , avec $r = r_1 + \cdots + r_m$ comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = h_1(x) \\ Z_2 = L_f h_1(x) \\ \vdots \\ Z_{r_1} = L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \vdots \\ Z_{r-m} = h_m(x) \\ Z_{r-m+1} = L_f h_m(x) \\ \vdots \\ Z_r = L_f^{r-m-1} h_m(x) \end{array} \right. \quad (\text{III .38})$$

On note si $n > r$ il est toujours possible de choisir $(n-r)$ fonctions l_1, \dots, l_{n-r} pour compléter le difféomorphisme avec un tel choix, la forme normale devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = Z_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_{r_1-1} = Z_{r_1} \\ \dot{Z}_{r_1} = b_1(Z) + a_n(Z)u_1 + \dots + a_{1m}(z)u_m \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{Z}_{r-m-1} = Z_{r-m} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_r = b_m(Z) + a_{m1}(Z)u_1 + \dots + a_{mm}(Z)u_m \\ \eta = q_m(Z) + p_1(Z)u_1 + \dots + p_m(Z)u_m \end{array} \right. \quad (\text{III .39})$$

On peut montrer que si la distribution engendrée par $\{g_1, \dots, g_m\}$ est involutive alors on peut toujours compléter le difféomorphisme par des fonctions η_i telle que $\eta_i = 0$.

III.4.3. Calcul de la commande

Soit le système dont le degré relatif (r_1, r_2, \dots, r_m) est telle que $r_1 + r_2 + \dots, r_m = n$

En prenant en compte que :

$$y_1 = h_1(x) = Z_1 \quad y_2 = h_2(x) = Z_{r_1+1} \quad (\text{III .40})$$

$$\text{Et} \quad y_3 = h_3(x) = Z_{r_1+r_2+1} \quad (\text{III .41})$$

On trouve

$$y_j^{(n)} = L_f^n h_j(x) + \sum_{i=1}^n L_{g_i} L_f^{n-1} h_j(x) u_i \quad (\text{III .42})$$

Puis on obtient l'écriture vectorielle suivante :

$$\begin{pmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p^{(r_p)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ L_f^{r_2} h_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{pmatrix} + \Omega(x) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_p \end{pmatrix} \quad (\text{III .43})$$

On voit facilement que si on choisit le retour d'état :

$$u = -\Omega^{-1}(x) \begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ L_f^{r_2} h_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{pmatrix} + \Omega^{-1}(x) v \quad (\text{III .44})$$

Alors le système bouclé s'écrit :

$$\begin{pmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p^{(r_p)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_p \end{pmatrix} \quad (\text{III .45})$$

Qui n'est autre que une forme linéarisé et découplé.

Cette dynamique est composée de 'm' dynamiques linéaires découplées à savoir la sortie y_i ne dépend que de la nouvelle entrée V_i correspondante.

De la même manière que dans le cas des systèmes mono variables, on peut imposer à chaque sous système un comportement E/S désiré, en choisissant convenablement les nouvelles entrée V_i après ce bouclage le système est mis sous la forme canonique de Brunowsky.

$$\dot{Z} = AZ + bV \quad (\text{III.46})$$

$$y = CZ \quad (\text{III .47})$$

Ou :

$$A = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_p) \text{ et } b = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_p) \quad (\text{III .48})$$

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} [r_j, r_1] \quad (\text{III .49})$$

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de linéarisation par bouclage non-linéaire, dont le but est d'avoir un système linéaire équivalent à un système non linéaire.

Cette approche nous donne la possibilité d'appliquer les méthodes de commande linéaire exploitant leurs caractéristiques de synthèses sur les systèmes non linéaires mais d'une façon indirecte (à travers le difféomorphisme). Au premier lieu, nous avons donné quelques définitions de bases, tel que, le champ

de vecteur, dérivé et crochet de Lie, le difféomorphisme ainsi que la forme normale.

Finalement nous avons étudié en détail les deux cas de systèmes, mono variable et multi variable.

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application de la commande décentralisée par mode glissement à un réseau électrique mono machine et à modèle non linéaire. Dans un premier lieu nous avons appliqué la commande MGS sur notre système à modèle non linéaire. Des simulations ont été effectuées, en boucle fermée.

En second lieu, nous allons synthétiser un bouclage non linéaire pour notre Système présenté dans chapitre 1. Pour cela, les notions théoriques exposées dans le chapitre (II) seront utilisées. La linéarisation exacte du système par bouclage est assurée par un choix adéquat des sorties selon l'objectif de la commande.

Dans ce travail notre objectif est de commander l'angle interne de la machine, ainsi que de stabiliser la tension terminale autour de la valeur nominale (1 pu), le choix de cette sortie est de grande importance.

Après avoir déterminé le degré relatif du système, le modèle est mis sous la forme normale à la base de laquelle nous déterminons la commande linéarisante.

Afin de vérifier l'efficacité de cette approche, des tests de simulations sont effectués.

La première partie est consacrée à la synthèse de la commande par mode de glissement statique, ainsi que les résultats de simulations effectués sur le système.

La deuxième partie nous avons synthétisés un bouclage non linéaire pour notre système.

Finalement la simulation des réponses et des comportements internes du système constitue une validation des lois élaborées. Pour cela, nous examinons les performances de poursuites et la robustesse de la commande.

IV.2 Le but de régulation d'un réseau électrique

Dans le cas général un réseau électrique est composé de plusieurs générateurs. Chaque générateur représente un sous-système du système global.

Dans notre étude, nous avons effectués la synthèse de la commande sur un seul sous-système interconnecté avec un nœud infini.

Le but général à travers la régulation automatique pour les réseaux électrique est bien sur de maintenir la stabilité des systèmes lors de l'apparition des défauts susceptibles de survenir dans les réseaux électriques. Ces défauts sont classés suivant leur nature en deux classes.

Perturbation lentes : de faible amplitude, comme par exemple, une faible surcharge ou une sur excitation. Elles sont peu contraignantes.

Perturbation rapide : de grande amplitude, elles sont souvent localisées. Comme par exemple, l'ouverture d'une ligne ou un court-circuit polyphasé. Ces perturbations sont contraignantes. [10]

Notre étude concerne la stabilité vis-à-vis des perturbations de forte amplitude, par conséquent, les objectifs de notre commande est de garder premièrement, le synchronisme du réseau, c'est-à-dire faire de telle sorte que le rotor de la machine synchrone tourne à la vitesse de synchronisme ω_0 . Deuxièmement, il faut que la tension terminale de la machine synchrone soit invariante après l'apparition du défaut.

Cela est équivalent à :

$$\Delta\omega = 0 \quad \delta = cts \quad Vt = 1 \text{ Pu}$$

Les perturbations qu'on va prendre en considération pour la suite sont les surcharges seulement.

IV.3 Conception de la commande MGS

Les équations décrivent le modèle d'ordre 3 du réseau mono machine peuvent être écrit Comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{2H}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{2H}(p_m - p_e) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd} - x_3 - \Delta x_d I_d) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Et soit x_1 , x_2 et x_3 tel que :

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta \\ x_2 &= \omega - \omega_0 \end{aligned} \quad (\text{IV.2})$$

$$x_3 = E'_q$$

En utilisant les équations (IV.1) et (IV.2) on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{D}{2H}x_2 - \frac{\omega_0}{2H}(p_m - p_e) \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd}(t) - x_3 - \Delta x_d I_d) \end{aligned} \quad (\text{IV.3})$$

Soit x_{1d} , x_{2d} et x_{3d} constantes d'état désirées du système donc $x_y = [x_d \ x_d \ x_d]$, la sortie du système et la déviation de l'angle de puissance de sa valeur désirée.

$$y = x_1 - x_{1d} \quad (\text{IV.4})$$

Les équations décrivent le système sont fortement non linéaire, pour faciliter la conception d'un contrôleur non linéaire. On doit faire un changement de variable.

Considérons le changement de variable $Z(t) = T(x)$, avec $[Z_1(t) \ Z_2(t) \ Z_3(t)]^T$ tel que :

$$\begin{aligned} Z_1 &= x_1 - x_{1d} \\ Z_2 &= x_2 \\ Z_3 &= \frac{\omega_0}{2H}(p_m - x_3 I_q) - \frac{D}{2H}(\omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (\text{IV.5})$$

Remarque :

L'inverse de l'équation donner par l'équation (IV.5) est tel- que :

$$\begin{aligned} x_1 &= z_1 + x_{1d} \\ x_2 &= z_2 \\ x_3 &= \frac{1}{q} \left[p_m - \frac{D}{\omega_0}(z_2 - \omega_0) - \frac{2H}{\omega_0} z_3 \right] \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

A partir des équations précédentes, l'équation du système peut être écrite comme fonction des nouvelles variables Z_1 , Z_2 et $Z_3(t)$ tel que :

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = f(z) + g(z).u \quad (\text{IV.7})$$

$$y(t) = Z_1(t) \quad (\text{IV.8})$$

Dans les coordonnées d'origine on a :

$$f(x) = -\frac{\omega_0}{2H} \left[\frac{1}{T_{d0}} (x_3 + \Delta x I_d) I_q - x_3 \dot{I}_q \right] \quad (\text{IV.9})$$

$$g(x) = -\frac{\omega_0 I_q}{2H T_{d0}}$$

IV.3.1 Surface de glissement

Le premier pas pour la construction d'un contrôleur en mode glissant statique et le choix d'une surface de commutation.

Soit la surface de glissement σ tel que : [17]

$$\begin{aligned} \sigma &= \ddot{y} + \alpha_1 \dot{y} + \alpha_2 y \\ &= z_3 + \alpha_1 z_2 + \alpha_2 z_1 \end{aligned} \quad (\text{IV.10})$$

Où α_1 et α_2 sont des scalaires positifs. En utilisant l'équation (IV.5), la surface de glissement peut être écrite comme fonction de x_1 , x_2 et x_3 tel que :

$$\sigma = \frac{\omega_0}{2H} (p_m - x_3 I_q) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) + \alpha_1 x_2 + \alpha_2 (x_1 - x_{1d}) \quad (\text{IV.11})$$

On note que le choix de la surface de commutation garantie que $y = z_1 = x_1 - x_{1d}$ converge vers 0 lorsque $t \rightarrow \infty$ sur la surface de glissement $\sigma = 0$.

IV.3.2 Détermination du degré relatif

Le degré relatif d'un système correspond au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître l'entrée. [11], [13]

Nous choisissons d'après l'objectif du réglage comme sortie l'angle interne de la machine $h_1(x) = x_1 = \delta_1$, et nous calculons leurs dérivées successives jusqu'à faire apparaître l'entrée.

La sortie désirée est : $h_1(x) = x_1$

Les dérivés de la surface $\dot{\sigma}, \ddot{\sigma}$ et $\sigma^{(3)}$ sont déterminé par :

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(x)}{dt} &= \frac{dx_1}{dt} - \dot{x}_1 = x_2 - \dot{x}_1 \\ \frac{d^2h_1(x)}{d^2t} &= \frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{\omega_0}{2H}(p_m - p_e) \\ \frac{d^3h_1(x)}{d^3t} &= \frac{d^3hx_1}{d^3t} = \frac{d^2x_2}{d^2t} = \frac{\omega_0}{2H} \frac{d}{dt}(p_m - p_e) \\ \frac{d^3h_1(x)}{d^3t} &= \frac{\omega_0}{2H} \left(\frac{dp_m}{dt} - \frac{dx_3}{dt} I_q - x_3 \frac{dI_q}{dt} \right)\end{aligned}\tag{IV.12}$$

$$\frac{d^3h_1(x)}{d^3t} = -\frac{\omega_0}{2H} \left[\frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - x_3 - \Delta x_d I_d) I_q + x_3 \dot{I}_q \right]$$

Avec :

$$I_q = \sum_{j=1}^2 E'_q (B_{1j} \cos(\delta_{1j}) + G_{1j} \sin(\delta_{1j}))\tag{IV.13}$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^2 E'_q (B_{1j} \sin(\delta_{1j}) - G_{1j} \cos(\delta_{1j}))\tag{IV.14}$$

Le degré relatif correspondant à ce système est ($r = n = 3$).

La loi de commande par mode glissant statique appliqué au système non linéaire est exprimée par l'équation suivante : [17]

$$E_{fd} = -(\alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + w \operatorname{sign}(\sigma)) \quad (\text{IV.15})$$

IV.4 APPLICATION

Dans cette première application nous allons considérer la commande par mode glissant statique sur notre système non linéaire. Notre objectif est de maintenir l'angle interne du générateur à une valeur désirée, pour garder le synchronisme du réseau électrique, et de stabiliser la tension terminale près de la valeur nominale (1pu).

IV.4.1 Simulation de la commande

Ici nous montrons les réponses du réseau électrique pour le cas d'une machine avec l'application de la commande par mode glissant statique les valeurs de coefficient de la commande sont données dans l'annexe.

Dans un premier lieu, nous allons appliquer la commande MGS sur notre système non linéaire, mais avec des contraintes sur la commande d'excitation $E_{fd} \in [-1,1]$. Les résultats de simulation sont représentés dans la Fig. (IV.1). Par contre dans la deuxième application il n'y a pas de contraintes sur les tensions d'excitation, Fig. (IV. 2).

Remarque :

Comme tous contrôleurs à structure variable, le contrôleur proposé est confronté avec le problème de chatterring qui est indésirable en pratique.

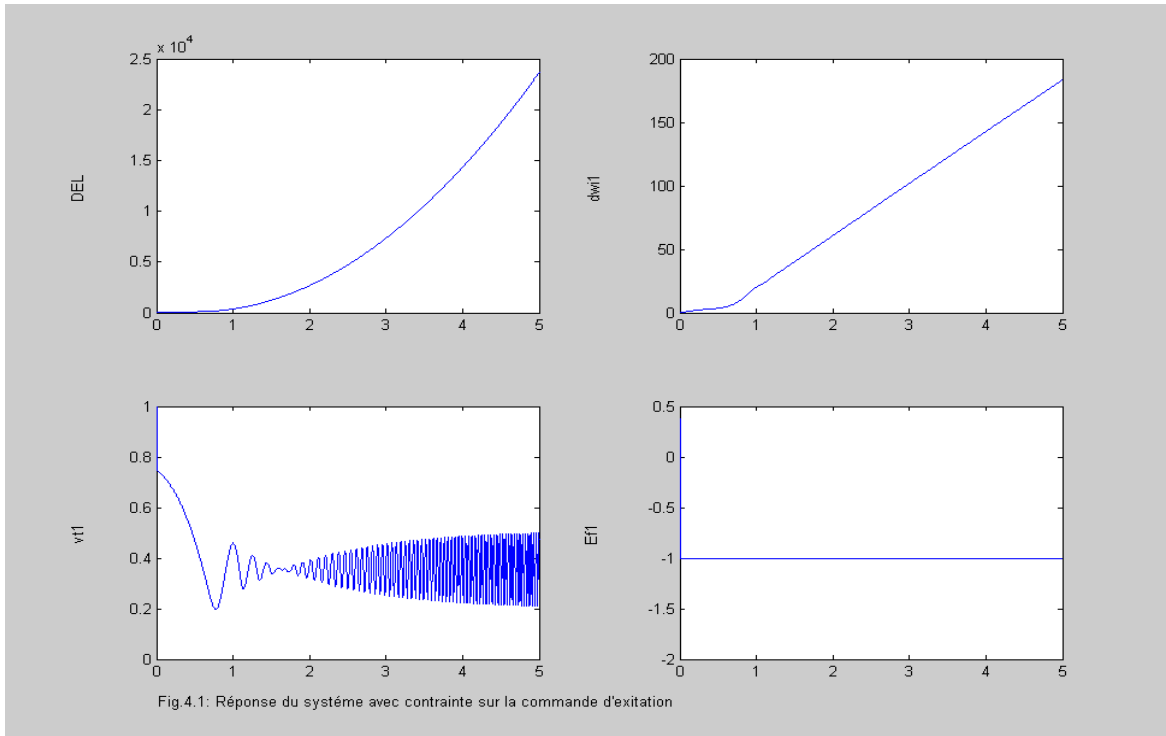


Fig.IV.1 : Réponse du système avec contrainte sur la commande d'excitation.

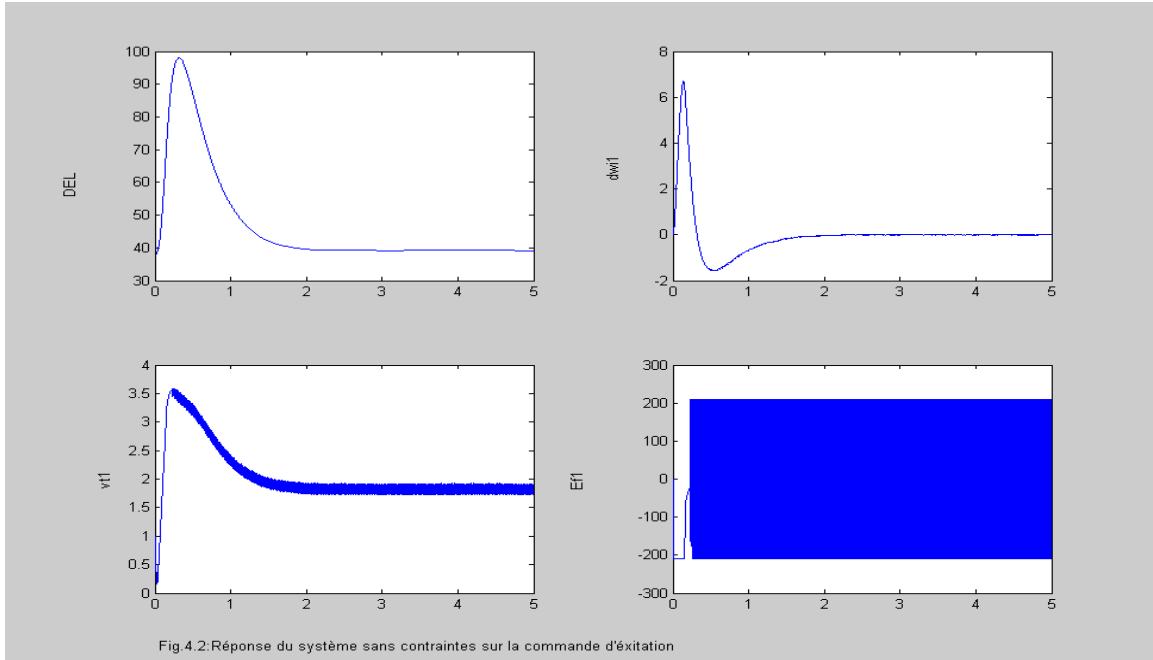


Fig.IV.2 : Réponse du système sans contrainte sur la commande d'excitation

IV.4.2 Résultats de simulations

Dans ce paragraphe nous avons appliqué la loi de commande par mode glissant statique a fin de forcer l'angle interne du générateur à suivre δ_d désiré.

D'après les résultats de simulation Fig. (IV.1), on remarque bien que les sorties tendent vers l'infini. Par contre pour la deuxième application Fig. (IV.2), tendent vers les valeurs désirés, à ce moment la variation de la vitesse s'annulent ainsi que la tension terminale est stabilisée autour de 1pu, mais après un grand dépassement qu'il n'est pas admissible en pratique. En outre, le signal de commande est excessivement élevé.

Vue les résultats de simulations obtenus sur le modèle non linéaire, il est devenu inévitable d'effectuer un bouclage linéarisant afin d'améliorer les performances de la commande MGS.

IV.5. Détermination de la forme normale

Lorsque le degré relatif du système est ($r = n = 3$), le système est complètement linéarisable au moyen d'une transformation de coordonnées et d'un bouclage non linéaire.

La forme normale d'un système donné par les équations différentielles (IV.5) est calculée à l'aide de la transformation non linéaire suivante : [11], [13], [14]

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = h_1(x) \\ Z_2 = L_f h_1(x) = x_2 \\ Z_3 = L_f^2 h_1(x) = \frac{\omega_0}{2H} (p_m - x_3 I_q) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) \end{array} \right. \quad (\text{IV.16})$$

La transformation inverse des coordonnées s'écrite :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = Z_1 \\ x_2 = Z_2 \\ x_3 = \frac{1}{I_q} \left[p_m - \frac{D}{\omega_0} (Z_2 - \omega_0) - \frac{2H}{\omega_0} Z_3 \right] \end{array} \right. \quad (\text{IV.17})$$

A partir de (IV.15) nous obtenons la forme normale du système :

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (\text{IV.18})$$

IV.5.1 Détermination de la commande linéarisante

La commande qui linéarise le système à une machine s'écrit comme suit :

$$E_{\text{fd}} = -\frac{1}{L_g L_f^2 h_1(x)} [L_f^3 h_1(x) - u] \quad (\text{IV.19})$$

Avec:

$$L_g L_f^2 h_1(x) = \frac{-\omega_0 I_{q1}}{2H_1 T_{d01}'} \quad (\text{IV.20})$$

$$L_f^3 h_1(x) = \frac{\omega_0}{2H_1} \left[\frac{1}{T_{d01}'} (x_{31} + \Delta x_{d1} I_{d1}) I_{q1} - x_{31} \dot{I}_{q1} \right] \quad (\text{IV.21})$$

$$u = -(\alpha_1 z_{13} + \alpha_2 z_{12} + w \text{sign}(\sigma)) \quad (\text{IV.22})$$

Rappelant que :

$$\begin{cases} x_1 = z_1 \\ x_2 = z_2 \\ x_3 = \frac{1}{I_q} \left[p_m - \frac{D}{\omega_0} (z_2 - \omega_0) - \frac{2H}{\omega_0} z_3 \right] \end{cases} \quad (\text{IV.23})$$

IV.6. Surface de glissement

La première étape dans la conception de la commande est le choix de la surface de commutation $\sigma(z)$, où la sortie d'état c'est x_1 (l'angle interne de la machine) ou bien ici z_1 . La surface de commutation devient [17]

$$\sigma = z_3 + \alpha_1 z_2 + \alpha_2 z_1 \quad (\text{IV.24})$$

Avec :

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - x_{1d} \\ z_2 &= x_2 \\ z_3 &= \frac{\omega_0}{2H} (p_m - x_3 I_q) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (\text{IV.25})$$

La loi de commande est écrite par l'équation suivante :

$$u = -(\alpha_1 z_3 + \alpha_2 z_2 + w \text{sign}(\sigma)) \quad (\text{IV.26})$$

Où les valeurs de α_1 , α_2 et x_d sont données dans l'annexe.

A partir de (IV.25) et (IV.26), la loi de commande d'excitation devient :

$$E_{fd} = -\frac{1}{L_g L_f^2 h_1(x)} \left[-L_f^3 h_1(x) - w + u \right] \quad (\text{IV.27})$$

IV.7 Application

Dans ce paragraphe nous allons appliquer la commande par mode glissant statique sur notre système linearisé par bouclage non linéaire. Notre objectif est de commander l'angle interne du générateur, pour garder le synchronisme du réseau électrique mono machine, et de stabiliser la tension terminale a une valeur bien défini près de 1pu.

Pour cela, nous avons effectué des essais pour tester la robustesse de cette commande, pour les valeurs des coefficients de commandes et la δ_d , voir l'annexe..

IV.7.1 Simulation avec test de robustesses

Nous réaliserons les simulations avec deux tests de robustesses.

Le premier test est l'accroissement brutal de la puissance mécanique de 20%, voir Fig. (IV.3).

Le deuxième test c'est la robustesse par rapport au court circuit pendant 0.05 (s), la réponse du système devant ce court circuit est monter dans le Fig.(IV.4).

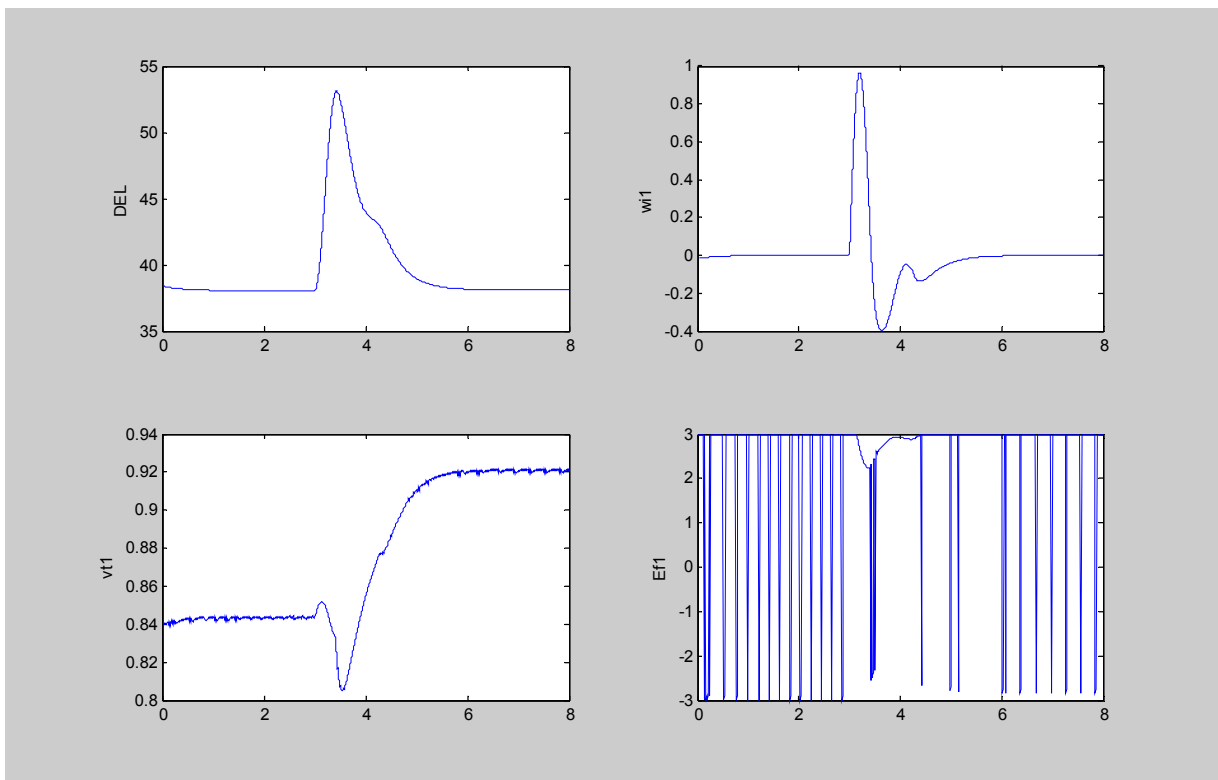


Fig. IV.3 : réseau à une machine avec accroissement de 20% de la puissance mécanique avec réglage statique

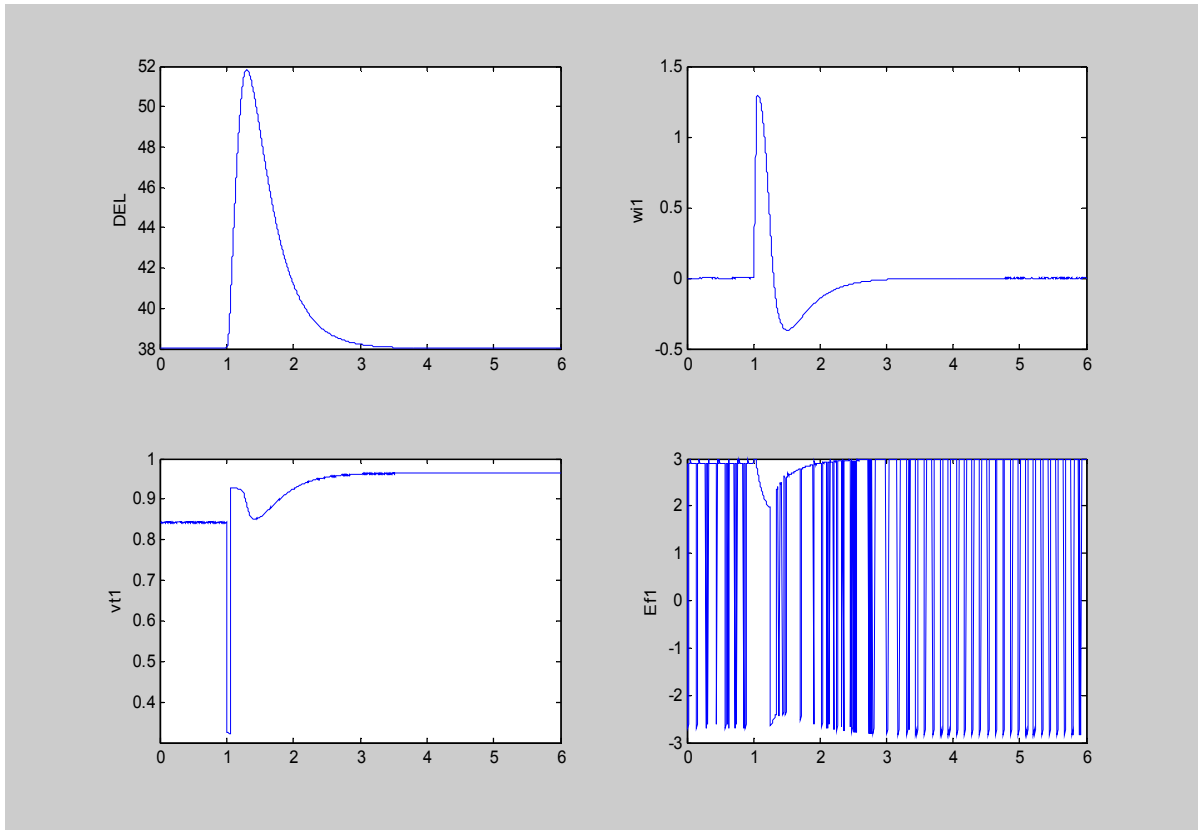


Figure. IV.4 : Réponse du système à une machine avec court-circuit triphasé avec réglage statique décentralisé

IV.7.2 Résultats de simulation

D'après les résultats de simulations, on peut observer la robustesses de commande par rapport à l'accroissement brutal de la puissance mécanique et aux court-circuit.

L'objectif de ce mémoire est la synthèse d'une loi de commande décentralisée par mode glissant dynamique, pour la commande de réseau électrique multi-machine non linéaire. Ceci dans le but de la stabilisation.

Nous avons élaboré à cet effet, un schéma de commande permettant de régler le problème de la synchronisation (l'angle interne) au niveau de chaque machine du réseau électrique multi-machine, par conséquent la stabilisation de la tension terminale autour de la valeur minimale (1 pu).

Dans ce contexte, nous avons proposé une méthode de synthèse de régulateurs décentralisés combiné avec technique de linéarisation par bouclage non linéaire.

La décentralisation simplifie largement la synthèse de la commande par mode glissant statique et dynamique. Car elle permet de synthèse pour chaque sous-système une commande locale.

Le réseau électrique est un système complexe fortement interconnectés, pour lesquels l'élaboration d'une étude profite pleinement de la technique de décentralisation. Pour cela, dans le premier chapitre, nous avons présenté les éléments nécessaires pour la modélisation des réseaux électriques multi-machines. Un modèle non linéaire a été élaboré pour un réseau comportant n générateur ce modèle permettre d'évaluer la stabilité transitoire. Afin de valider le modèle ainsi obtenu des tests simulations on été effectués. Un accroissement brutal de la puissance mécanique a été également simulé.

La linéarisation par bouclage non linéaire est mise en œuvre dont l'objectif est de décentralisé notre système multi-machine non linéaire. Pour le quel nous pouvons appliquer la commande par mode glissant. C'est l'objet de deuxième chapitre, qui représente en détaille la technique de linéarisation par bouclage non linéaire pour les deux cas, monovariante. Et multi variable.

Avant d'entamer l'application de la commande par mode glissant décentralisée, et dont le but de mieux comprendre l'apport et l'utilité de cette technique, Nous avons présentés les notions de bases telles que l'attractivité et l'invariance des surfaces de glissements, la commande équivalente, la dynamique en régime glissant, les propriétés de robustesses ainsi que le phénomène de chattering.

Le dernier chapitre a été l'application de la commande par mode glissant décentralisé a un réseau électrique multi machine non linéaire. Mais avant d'entamer cette application nous avons appliqué la commande par mode glissant sur notre système non linéaire. Des résultats de simulation montrent bien que cette commande n'est pas efficace. Pour cela il fallait donc trouver une autre méthode sans changement de la commande, donc c'est l'objet de deuxième partie de cette application qui est l'application de la commande par mode glissant décentralisée sur notre système linéarisé par bouclage non linéaire. Dans le but de supprimer le phénomène de chattering nous avons introduit la commande par mode glissant dynamique qui a permis de réduire le phénomène de chattering.

L'application sur le réseau électrique a montré les bonnes performances de cette technique et nous permis de remarquer que nous pouvons utiliser la technique de décentralisation si on prend en considération les approximations des termes d'interconnexions.

Les tests de robustesses sont basés sur l'application des perturbations sévères, rapides et de fortes amplitudes pour pouvoir évaluer la stabilité transitoire du réseau électrique.

Le premier test est l'accroissement des puissances mécaniques fournies aux rotors des générateurs de 20%. Les résultats de simulation montrent bien que ce test est réussi pour toutes les stations de commandes car nous avons vu que les effets de cette perturbation sont atténués rapidement.

Le deuxième test est un court-circuit triphasé appliqué pendant une durée de 0.05 s suivi par l'ouverture de la ligne effectuée. Les différents contrôleurs ont pu surmonter cette perturbation et ont parvenus à rétablir le réglage des angles internes ainsi que stabiliser les tensions terminales à une valeur près de 1 pu de chaque générateur c'est à dire assurer la stabilité transitoire.

Le dernier est, concernant l'efficacité de la décentralisation, est réalisé par la simulation d'une défaillance station de commande locale. Ce test a montré que les contrôleurs par mode glissant non défaillants arrivent à supporter cette perturbation, ce qui assure la stabilité transitoire du réseau électrique.

Finalement, et tant que le phénomène de chattering a toujours existé, nous avons utilisé la commande par mode de glissement dynamique..

Les résultats de simulations montrent bien que cette méthode est efficace dont le terme d'éliminer totalement le phénomène de chattering.

Ainsi, les résultats montrant l'efficacité des approches proposées en terme de robustesse vis à vis du court-circuit, l'accroissement brutal de la puissance mécanique et de la défaillance de la commande locale.

On peut tirer les remarques suivantes sur l'approche utilisée :

Les avantages :

- Cette commande permet de diminuer le volume de calculs au niveau des unités de commandes locales ainsi que la minimisation du taux d'échange d'informations entre les sous-système utiliser pour la génération des lois de commande. Ceci est du a la décentralisation.
- Convergence en temps fini de la sortie vers la référence désiré.
- Meilleur précision de la convergence.
- Temps de réponse est petit.

Les inconvénients :

- Présence de phénomène de chattering.

Bibliographie :

- [1] **H.Buhler**, réglage par mode de glissement, Traite d'électricité, presses Polytechniques romandes, Lausanne, 1986.
- [2] **H.Buhler**, Réglages échantillonnes, Tome-2, Presses polytechniques romandes, Lausanne, Switzerland 1988.
- [3] **H.Buhler**, réglage d'état bases et compléments, collection électricité, presses Polytechniques romandes, Lausanne, 2003.
- [4] **V.I.Utkin**, Sliding mode and their application in variable structure systems, MIR Publishers, Moscow, 1978
- [5] **V.I.Utkin**, variable structure system with sliding modes, IEEE Trans. On Automatic Control, Vol.AC-22, April 1977, pp.212-222.
- [6] **O.M.E. El-Gheawi**, A.S.I Zinober and S.A Billings, Analysis and design of Variable structure systems using geometric approach, Int.j.Control, Vol.38. No.3, 1983,pp.657- 671.
- [7] **G.P. Matthews**, variable structure control of interconnected nonlinear systems, Phd Thesis, Perdue University, 1985.
- [8] **j.Machowski**, J.W.Bialekl J.R . Bunly , Power system dynamic and stability, New York: London: John Wiley, 1997.
- [9] **Melahic Ahmed**, Commande Décentralisée par logique floue des processus complexe Application au réseau électrique, thèse de Magister ENP 2001.
- [10] **Ourari.M**, Commande multivariable par mode de glissement appliquée aux convertisseurs électriques, thèse de Magister ENP 1995.
- [11] **Ling Fan**, Ali Feliachi, Asad Davar, Decentralized Control of power systems Using Disturbance Accommodation Technique, Proceeding of American Control Conference Arlington, VA June-25-27, 2001.
- [12] **J.Machowski**, S.Rboak, J.W.Bialek, J.K.Bumby, N.Abi-Samra, Decentralized Stability Enhancing Control of synchronous generator IEEE Transactions on power systems, Vol 15, N°4, Novembre 2000.
- [13] **D.Rerkpreedapong**, **A.Fliachi**, Decentralized control of Nonlinear Electric Power System Thru Excitation and Governor Systems Using Local Measurement and Feedback Linearization, Proc-42rd, IEEE Midwest Symp. .On circuit and systems, Lansing MI, Aug 8-11-2000.
- [14] **J.W.Chapman**, **MDLic**, CAKing, L.Eng, H.Kaufman, Stabilising a multi-Machines Power system via decentralized feedback Linerarizing Excitation control, IEEE Transaction on power systems.Vol.8, N°3, August 1993.

- [15] **H.Nijmeijer**, AJvan der Schaft, Nonlinear Dynamical Control Systems, Springer-Verlag New York Inc.1990.
- [16] **H.K.khalil**, Nonlinear systems, prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 1996
- [17] **Benahdouga S**, Commande par Mode de Glissement d'Ordre supérieur: Application à un Réseau Electrique multi-machines, thèse de Magister en automatique ,ENP
- [18] **S. Skogestad**, L. Postilestad., Multi variable feedback control : Analysis and design, England: John Wily and sons, 1996
- [19] **L.jaulin**, Représentation d'état pour la modélisation et la commande des systèmes, Paris; Hermès science publication, 2005
- [20] **E.Mariani, S.S.Murthy**, Control of modern integrated power systems, London: Springer ,1997
- [21] **D.Boukhatala**, commande décentralise des systèmes structures, Thèse de Magister ENP 1993
- [22] **B . Ammari**, A. B Tahari, commande décentralisé des systèmes complexes ; Application au réseau électrique, Thèse de PFE, ENP, 1995.
- [23] **M.Zribi, M.Ai-Rifai**, Transient Stability of Power Systems Using Sliding Mode Controllers, Journal of Applied Sciences 6(3):2006.
- [24] **Hung, J.Y.**, W.Gao and J.C.Hung, 1993 Variable structure control: A survey IEEE Transaction on Industrial Electronics, 40: 2-22
- [25] **Sira - Ramirez H**, O.Llanes - Santiago and N.A Fernandez. 1996 .On the stabilization of nonlinear systems via input - dependent sliding surfaces. Intl. j Robust and Nonlinear control, 6:771-780.
- [26] **B.L. Walcott, S.H.zak**, Observation and control of nonlinear uncertain dynamical Systems : A variable structure approach, TR-EE 86-41, Perdue University, 1986.
- [27] **Kundur.p**, 1993, Power System Stability and Control, McGraw - Hill, Ine.
- [28] **Lahdhiri, T**, and A.T. Alouani, 1997. Design of nonlinear excitation Controller for a synchronous generator using the concept of exact stochastic feedback linearization. Proceedings of American Control Conference, New Mexico, 1:3798-3803.
- [29] **Levine, W.S.**, 1996. The Control Handbook, CRC press, MA, USA.
- [30] **A.Necib, O.Zeroual**, Commande décentralise optimale et par placement de pôles Application a un réseau électrique. PEF en automatique : ENP, 1998.

ANNEXE_A

PARAMETRES DU RESEAU UNE MACHINE

Paramètre de charge

$$A = 0.4257 - j2.038 \text{ p.u}$$

Parameters de la machine

Machine	$x_d(p.u)$	$x'_d(p.u)$	$T'_{d0}(p.u)$	$H(s)$	D
1	1.68	0.32	4.0	2.31	0

Points de fonctionnements

Machine	$\delta(\text{deg})$	$P_m(p.u)$	$E_f(p.u)$	$V_i(p.u)$	$E'q(p.u)$	$Iq(p.u)$	$Ia(p.u)$
1	37.93	0.8005	0.3770	0.9999	0.8430	0.9497	-0.3426

Calcul de la matrice admittance

Le défaut considéré ici est un court-circuit triphasé survenant à la ligne de transmission qui lie le nœud (1) au nœud infini égal à 20% de la longueur de cette ligne. Ce défaut est poursuivi par l'ouverture de cette ligne de transmission.

Matrice d'admittance avant le défaut

Les matrices d'admittance sont :

$$Bbd = [0.1827 \quad -0.1161]$$

$$Gbd = [-1.5941 \quad 1.1017]$$

Matrice d'admittance pendant le défaut

Les matrices d'admittances sont :

$$Bdd = [0.1023 \quad -0.0245]$$

$$Gdd = [-2.4492 \quad 0.3384]$$

Matrice d'admittance après le défaut

Les matrices d'admittance sont :

$$Bad = [0.2137 \quad -0.1134]$$

$$Gad = [-1.1909 \quad 0.9830]$$

ANNEXE_B

PARAMETRES DE LOIS DE COMMANDES

B.1 Paramètres de loi de commande en mode glissant statique.

$$E_{fdi} = -(\alpha_1 z_{3i} + \alpha_2 z_{2i} + w_i \text{sign}(\sigma_i))$$

N°Fig	Machine	δ (deg) désiré	Coef α_1	Coef α_2	Coef w	Intervalle de Efd
IV-1	1	37.93	10	20	30	[-1,1]
IV-2	1	37.93	10	20	30	[-200,200]

B.2 Paramètres de loi de commande en mode glissant statique.

La loi de commande d'excitation est la suivante:

$$E_{fdi} = -\frac{1}{L_g L_f^2 h_{1i}(x)} [-L_f^3 h_{1i}(x) - w_i + u_i]$$

La loi de commande est donnée par l'équation suivante :

$$u_i = -(\alpha_1 z_{3i} + \alpha_2 z_{2i} + w_i \text{sign}(\sigma_i))$$

N° Fig	Machine	δ désirée	α_1	α_2	w	Test de robustesse	Intervalle de Efd
IV.3	1	37.93	10	20	500	Accroissement brutale de la puissance à t=3 s	[-3,3]
IV.4	1	37.93	10	20	450	Court-circuit à t=3s	[-3,3]

