

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

Master Académique en Automatique

Option: Automatique et Systèmes

Thème

Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique

Présenté par

SAIBI Hayat

KASSOURI Dalila

Mémoire soutenu publiquement le 21 juin 2018 devant le jury composé de:

| | | | |
|----------------|--------------------------------|-------|-----------|
| Djennoune Said | Professeur | UMMTO | Président |
| DJEGHALI Nadia | Maître de Conférences classe A | UMMTO | Encadreur |
| Si-Ammour Amar | Maître de Conférences classe A | UMMTO | Examineur |
| Zaobot Zohra | Maître Assistant classe A | UMMTO | Examineur |

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail et nous tenons à remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin contribué à l'aboutissement de notre travail, et nous citerons en particulier :

Nos chers parents sans lesquels rien ne serait, pour toutes les nuits qu'ils ont passées à veiller pour que nous réussissions.

Nos frères et sœurs pour leur soutien.

Nous tenons à remercier M^{me} Nadia. DJEGHALI, notre chère promotrice pour sa patience et sa précieuse aide le long de cette période.

A tous les enseignants du département Automatique sans exception qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Nos remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Enfin, nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui nous ont aidées, encouragées et soutenues.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère et mon cher père;

A mes frères et mes sœurs que j'aime beaucoup;

A mes chers grands parents;

A tous mes ami(e)s;

A tous ceux qui se reconnaîtront et qui me connaissent;

Toute la promotion d'Automatique 2017/2018;

Bon courage à tous.

hayat

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail;

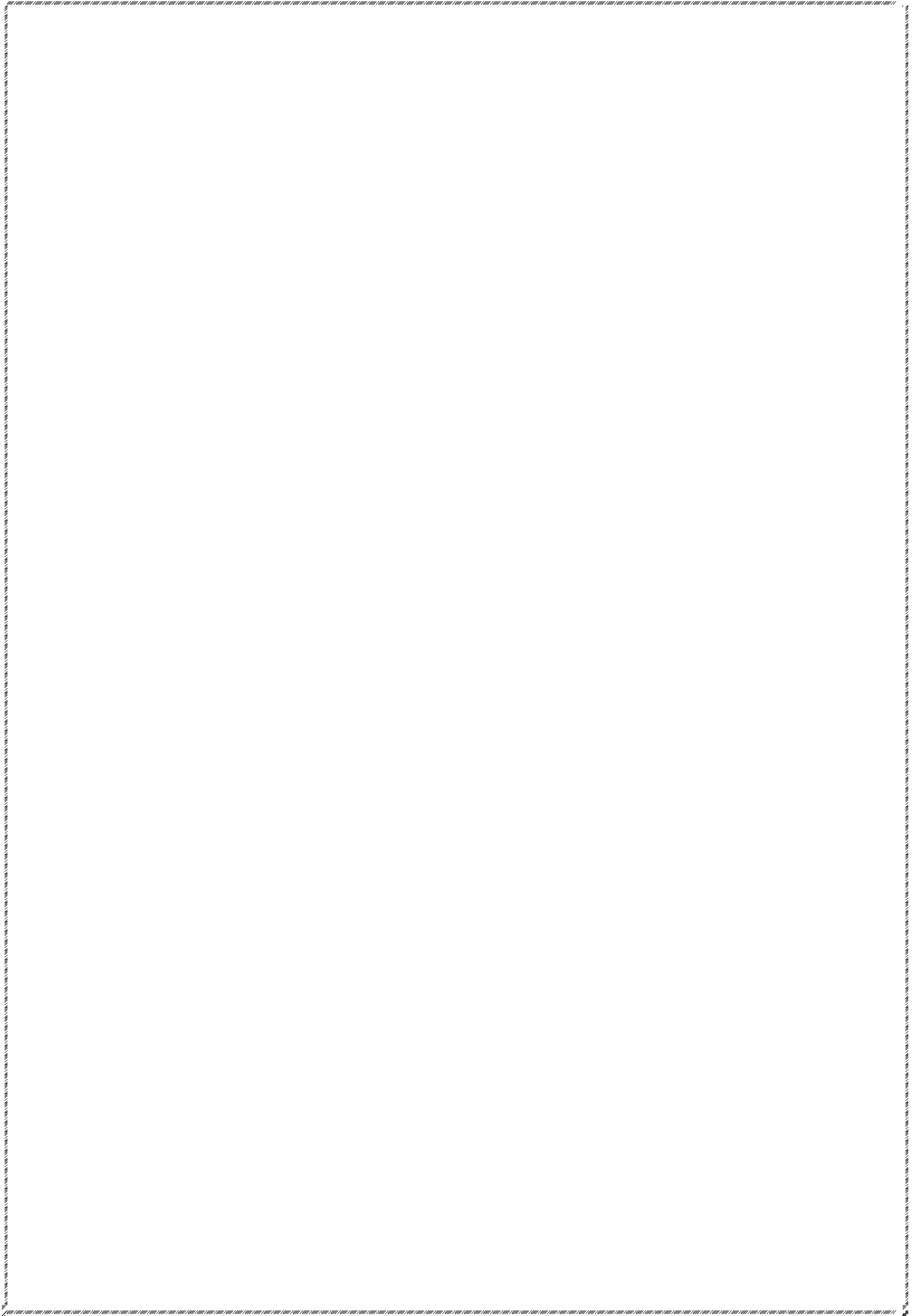
A mes parents;

A toute ma grande famille;

A mon époux pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce mémoire;

A mon petit-fils Ali.

Dalila



Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre 1 **Commande d'ordre fractionnaire**

| | |
|---|---|
| 1.1 Introduction | 4 |
| 1.2 Calcul fractionnaire | 4 |
| 1.2.1 Les fonctions utilisées dans le calcul fractionnaire | 4 |
| 1.2.1.1 La fonction Gamma | 4 |
| 1.2.1.2 Fonction de Mittag-Leffler | 5 |
| 1.3 Les opérations d'ordre non entier..... | 5 |
| 1.3.1 Intégration non entière | 5 |
| 1.3.2 Dérivation non entière | 6 |
| 1.3.2.1 Définition de Riemann-Liouville (R-L)..... | 6 |
| 1.3.2.2 Définition de la dérivée d'ordre non entier de Caputo..... | 6 |
| 1.3.2.3 Définition de la dérivée d'ordre non entier de Grünwald-Letnikov (G-L)..... | 7 |
| 1.4 Système d'ordre fractionnaire | 8 |
| 1.4.1 Equation différentielle d'ordre fractionnaire..... | 8 |
| 1.4.2 Fonction de transfert d'ordre fractionnaire..... | 8 |
| 1.4.3 La représentation d'état d'ordre fractionnaire | 8 |
| 1.5 Commande d'ordre fractionnaire | 9 |
| 1.6 Conclusion..... | 9 |

Chapitre 2 **Commande par mode glissant**

| | |
|--|----|
| 2.1 Introduction | 10 |
| 2.2 La théorie de la commande par mode de glissement..... | 10 |
| 2.3 Conception de la commande par mode glissant | 11 |
| 2.3.1 Choix de la surface de glissement | 12 |
| 2.3.2 Conditions de convergence et d'existence..... | 12 |
| 2.3.2.1 La fonction discrète de commutation | 13 |
| 2.3.2.1 La fonction de Lyapunov | 13 |
| 2.3.3 Calcul de la commande | 14 |
| 2.3.3.1 Principe de la commande de glissement dans le cas linéaire | 16 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Synthèse de la surface de glissement | 17 |
| 2.5 Phénomène de réticence | 19 |
| 2.6 Conclusion..... | 21 |

| | |
|-------------------|---|
| Chapitre 3 | Modélisation des réseaux électriques |
|-------------------|---|

| | |
|---|----|
| 3.1 Introduction | 22 |
| 3.2 Les composants d'un réseau électrique | 22 |
| 3.2.1 Les générateurs | 22 |
| 3.2.2 Les lignes de transmission | 22 |
| 3.2.3 Les transformations de puissance | 23 |
| 3.2.4 Les charges | 23 |
| 3.2.5 Consommateurs | 23 |
| 3.3 Modélisation..... | 24 |
| 3.3.1 Modèle de la partie mécanique | 24 |
| 3.3.2 Modèle de la partie électrique | 25 |
| 3.3.2.1 Principe de la transformation de Park..... | 25 |
| 3.3.2.2 Equations électriques de la machine..... | 25 |
| 3.3.3 Modèle électrique | 27 |
| 3.3.4 La matrice d'admittance..... | 30 |
| 3.3.4.1 La matrice d'admittance du réseau avant le défaut | 31 |
| 3.3.4.2 La matrice d'admittance pendant le défaut..... | 31 |
| 3.3.4.3 La matrice d'admittance après le défaut | 31 |
| 3.3.4.4 La formulation de la matrice d'admittance..... | 31 |
| 3.3.5 Modèle d'un réseau multi-machines | 33 |
| 3.3.6 La stabilité des réseaux électriques..... | 35 |
| 3.3.6.1 La stabilité en régime statique | 35 |
| 3.3.6.2 La stabilité en régime dynamique | 35 |
| 3.3.6.3 La stabilité en régime transitoire | 35 |
| 3.3.7 La robustesse d'un réseau électrique | 36 |
| 3.7 Conclusion..... | 36 |

| | |
|-------------------|---|
| Chapitre 4 | Application à un réseau électrique |
|-------------------|---|

| | |
|------------------------|----|
| 4.1 Introduction | 38 |
|------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 4.2 Description du réseau électrique étudié | 38 |
| 4.3 Modèle du réseau électrique..... | 39 |
| 4.4 La linéarisation | 39 |
| 4.5 Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire | 40 |
| 4.5.1 La surface de glissement | 40 |
| 4.5.2 Calcul des commandes γ_i | 40 |
| 4.6 Les résultat de simulation..... | 41 |
| 4.6.1 Interprétation des résultats de simulation..... | 43 |
| 4.7 Test de robustesse (court-circuit) | 44 |
| 4.7.1 Les résultats de simulation en présence d'un court-circuit | 45 |
| 4.7.2 Interprétation des résultats de simulation..... | 46 |
| 4.8 Conclusion..... | 46 |
| Conclusion générale | 48 |
| Annexes | 50 |
| Bibliographie | 51 |



Introduction générale

Le monde industriel connaît actuellement un énorme développement technologique, sous l'effet de la concurrence et des besoins de plus en plus exigeants du point de vue qualité et performances. Ce progrès technologique et industriel est dû au grand saut qualitatif qu'a connu l'outil informatique logiciel et matériel, notamment depuis l'apparition des microprocesseurs, ce qui a permis de rendre possible l'application des méthodes et des techniques considérées jusqu'à présent comme purement théoriques. Cela est dû aussi au développement qu'a connu la recherche dans divers domaines tels que ceux de l'analyse numérique et de la théorie des systèmes. Tout ceci a permis de mettre en œuvre des méthodes et des approches très complexes pour l'identification et la commande des systèmes [1].

Les systèmes électriques subissent depuis plusieurs années des évolutions technologiques fortes qui complexifient leur fonctionnement et par conséquent leur dimensionnement. Le vecteur électrique prend ainsi une part de plus en plus importante parmi les autres secteurs énergétiques (hydraulique et pneumatique) pour l'alimentation des charges qui sont elles-mêmes de nature de plus en plus électrique. Une réflexion profonde sur le choix des architectures d'alimentation électrique et de commande doit donc être menée pour s'adapter à cette électrification des systèmes et respecter les contraintes dynamiques et harmoniques normalisées [2].

D'une manière générale, les systèmes réels sont essentiellement non linéaires et sont soumis à des perturbations externes. La modélisation de ces systèmes relève très souvent d'une approximation des systèmes pour lesquels on souhaite construire une commande. Cette commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres et aux perturbations.

Les systèmes d'ordre fractionnaire ont reçu un intérêt considérable dans de nombreux domaines des sciences appliquées et de l'ingénierie. Ces systèmes sont généralement décrits par des équations différentielles d'ordre fractionnaire. Dans le domaine fréquentiel, ils sont représentés par des fonctions de transfert irrationnelles. Comme ils n'ont pas de solutions analytiques exactes, les techniques numériques et d'approximation sont largement utilisées pour leur résolution, analyse et implémentation.

L'application du calcul fractionnaire dans la commande et l'observation des systèmes a connu un grand succès. En effet, plusieurs schémas de commande et d'observation ont été proposés [3]- [4]. L'intérêt majeur de la commande d'ordre fractionnaire est l'amélioration et l'optimisation des performances du système à commander en utilisant les concepts de la théorie

des dérivées, intégrale d'ordre fractionnaire. En effet, le réglage de l'ordre fractionnaire peut améliorer les caractéristiques du systèmes.

La commande par mode glissant est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par sa robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques du modèle et des perturbations extérieures.

Notre travail concerne l'application de la commande fractionnaire par mode glissant sur un réseau électrique multi-machines afin d'améliorer la stabilité du système.

Le mémoire est organisé comme suit:

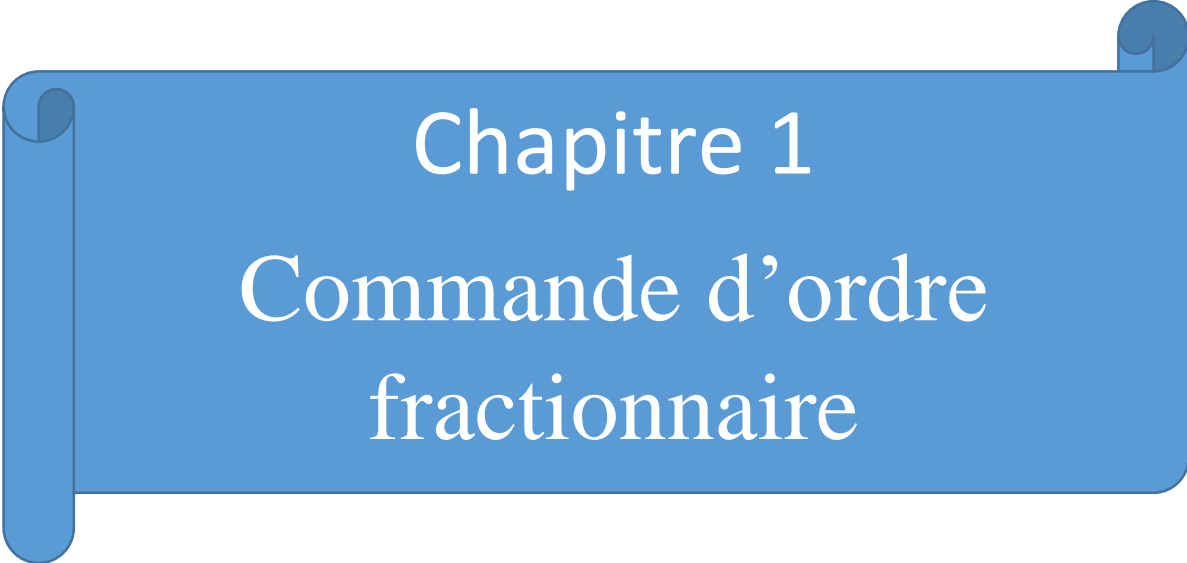
Le premier chapitre est consacré à des généralités sur la commande et les systèmes fractionnaires. Nous rappelons tout d'abord les différentes définitions de la dérivation et de l'intégration fractionnaire, éléments essentiels des systèmes d'ordre fractionnaire. Nous présentons ensuite les différentes représentations des systèmes non entiers: équation différentielle fractionnaire, la fonction de transfert et la représentation d'état fractionnaire. Enfin, nous citons brièvement les différents travaux réalisés dans le cadre de la commande fractionnaire.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter le principe de la commande par mode glissant ainsi que sa méthode de conception dans le cas de systèmes linéaires.

Le chapitre trois est consacré à la modélisation des réseaux électriques. Après une brève description des différents éléments constituant un réseau électrique, nous élaborons le modèle du réseau électrique à n générateurs.

Le quatrième chapitre constitue la contribution de notre mémoire. Il porte sur la synthèse de la commande par mode glissants d'ordre fractionnaire en considérant un réseau électrique à trois générateurs. L'approche de synthèse de la commande est basée sur la linéarisation par bouclage non linéaire permettant d'élaborer la loi de commande à base du modèle linéaire résultant. La commande proposée sera validée par des simulations.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et quelques perspectives pouvant être envisagées.

A blue scroll graphic with a white border, featuring a rolled-up edge on the left and a small blue tab on the right. The text is centered on the scroll.

Chapitre 1

Commande d'ordre fractionnaire

1.1 Introduction

L'opération fractionnaire intégrro-différentielle (calcul fractionnaire) est une généralisation de l'intégration et de la différentiation à des opérateurs d'ordre entier.

La question des dérivées fractionnaires est abordée en 1695 par Leibniz dans une lettre adressée à l'Hôpital. Mais lorsque celui-ci lui demande quelle pourrait être la dérivée d'ordre un demi de la fonction $x(t)$, par rapport à la variable t , Leibniz répond que cela mène à un paradoxe dont on tirera, un jour d'utiles conséquences. Le calcul fractionnaire est alors né.

Les systèmes de commande d'ordre fractionnaire ont montré des performances et des propriétés très intéressantes et à cet effet, des nombreuses applications de ces systèmes ont été effectuées dans différents domaines tel que le traitement de signal, traitement d'image, le contrôle automatique et l'énergie renouvelable [5].

1.2 Calcul fractionnaire

Le calcul fractionnaire est le champ de l'analyse mathématique et d'application des intégrales et des dérivées d'ordre arbitraire. Le calcul fractionnaire peut être considéré comme un sujet ancien et encore nouveau. Ces dernières années l'intérêt considérable pour le calcul fractionnaire a été stimulé par son application dans les différents domaines de la physique et de l'ingénierie. La représentation mathématique des systèmes fractionnaires dans le domaine temporel et fréquentiel correspond à des équations différentielles à exploiter. Vu l'absence des méthodes mathématiques, les systèmes dynamiques d'ordre fractionnaire étaient jusque-là étudiés de façon marginale seulement, que ce soit en théorie ou en application [6], [7].

1.2.1 Les fonctions utilisées dans le calcul fractionnaire

Dans la commande fractionnaire la fonction Gamma et la fonction Mittag-Leffler sont les deux fonctions les plus utilisées et qui permettent en général de fournir des solutions aux problèmes de calcul fractionnaire:

1.2.1.1 La fonction Gamma

L'une des fonctions de base utilisée dans le calcul fractionnaire est la fonction Gamma d'Euler. Son interprétation est simplement la généralisation du factoriel n ($n!$) et elle permet à n de prendre des valeurs non entières.

La définition de la fonction Gamma est donnée par:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt, \quad z > 0 \quad (1.1)$$

Elle est plus souvent utilisée même si elle est restreinte aux valeurs positives de z .

L'intégration par partie de (1.1) conduit à la relation de récurrence suivante:

$$\Gamma(z+1) = z \Gamma(z) \quad (1.2)$$

Puisque $\Gamma(1) = 1$, en utilisant la relation (1.2), nous obtenons pour $z = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$\Gamma(2) = 1 \quad \Gamma(2) = 1 !$$

$$\Gamma(3) = 2 \quad \Gamma(3) = 2 !$$

$$\Gamma(4) = 6 \quad \Gamma(4) = 3 !$$

$$\Gamma(n+1) = n \cdot \Gamma(n) = n \cdot (n-1) ! = n !$$

1.2.1.2 Fonction de Mittag-Leffler

La fonction de Mittag-Leffler est une fonction importante dans le monde du calcul fractionnaire. Son rôle est analogue à celui d'une fonction exponentielle dans le cas du calcul entier.

La définition de cette fonction est donnée par :

$$E_{\alpha}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)} \quad (\alpha > 0) \quad (1.4)$$

La fonction exponentielle usuelle correspond à une valeur de $\alpha = 1$.

1.3 Les opérations d'ordre non entier

Dans ce paragraphe, nous présenterons les opérateurs d'ordre non entier: l'opérateur du calcul d'intégration d'ordre non entier et l'opérateur de la différenciation d'ordre non entier. Il existe différentes définitions dans la littérature, nous citons quelques-unes, sachant que les deux définitions les plus utilisées sont celles de Riemann-Liouville et de Caputo [8].

1.3.1 Intégration non entière

Définition : Soit $\alpha \in R^+$ et f une fonction localement intégrable définie sur $[t_0, \infty[$ [9].

$${}_{t_0}I_t^{\alpha} F(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^t (t - \tau)^{\alpha-1} F(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

C'est l'intégration d'ordre fractionnaire de Riemann-Liouville.

avec $\Gamma(\alpha)$ la fonction Gamma d'Euler.

1.3.2 Dérivation non entière

La dérivation d'ordre non entier est la généralisation de la dérivée entière classique à des ordres non entiers quelconques. En effet, plusieurs mathématiciens ont contribué à l'élaboration de la théorie de la dérivation d'ordre non entier. Les plus familiers sont celles de Riemann-Liouville, de Caputo et de Grünwald-Letnikov.

1.3.2.1 Définition de Riemann-Liouville (R-L)

Le calcul de la dérivée d'ordre non entier α , compris entre $n-1$ et n ($n \in \mathbb{N}$), de la fonction $F(t)$ selon la définition de Riemann-Liouville est obtenu en deux étapes [10].

Première étape : calcul de l'intégral d'ordre non entier $(n - \alpha)$ de la fonction $F(t)$.

Deuxième étape : calcul de la dérivée d'ordre entier n du résultat de la première étape.

La fonction mathématique de cette définition est :

$${}_{t_0}^{RL} D_t^\alpha F(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \left[\int_{t_0}^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} F(\tau) d\tau \right] \quad (1.6)$$

Avec: $(n-1) < \alpha < n$

La notation ${}_{t_0} D_t^\alpha F(t)$ signifie la dérivée d'ordre non entier de la fonction $F(t)$ entre t_0 et t selon la définition de (R-L).

1.3.2.2 Définition de la dérivée d'ordre non entier de Caputo

Le calcul de la dérivée d'ordre non entier d'une fonction $F(t)$ selon la définition du Caputo est également obtenu en deux étapes [5]:

La première étape : calcul de la dérivée d'ordre entier n de la fonction $F(t)$.

La deuxième étape : calcul de l'intégration d'ordre non entier $(n-\alpha)$ du résultat de la première étape.

Cette définition est représentée par la formule mathématique suivante:

$${}_{t_0}^C D_t^\alpha F(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_{t_0}^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} F^{(n)}(\tau) d\tau \quad (1.7)$$

$F^{(n)}(\tau)$ étant la dérivée d'ordre entier n de la fonction $F(\tau)$.

La fonction ${}^C D_t^\alpha F(t)$ signifie la dérivée d'ordre non entier α de la fonction $F(t)$ entre t_0 et t selon la définition de Caputo.

Remarque: la différence entre la définition de la dérivée d'ordre non entier selon Caputo et la définition de la dérivée d'ordre non entier de Riemann-Liouville est comme suit:

- La dérivée d'ordre non entier de la fonction $F(t)$, selon la définition de Caputo, exige que la fonction $F(t)$ ainsi ses n dérivées successives soient nulles pour $t \leq 0$. Par contre, la définition de Riemann-Liouville exige seulement la causalité de $F(t)$.
- Pour la résolution des équations différentielles d'ordre non entier, la solution s'exprime en fonction des valeurs initiales d'ordre non entier ($y(0)$, $D^\alpha y(0)$, etc), alors que la solution obtenue, en utilisant la définition du Caputo s'exprime en fonction des valeurs initiales d'ordre entier qui sont plus pratique dans le domaine de la science physique par rapport à leurs dérivées d'ordre non entier.
- La dérivée d'ordre non entier d'une constante est une fonction non nulle qui dépend de la variable t selon la définition de Riemann-Liouville, alors que sa dérivée non entière est nulle selon la définition du Caputo.

1.3.2.3 Définition de la dérivée d'ordre non entier de Grünwald-Letnikov (G-L)

La dérivée généralisée d'une fonction $F(t)$ peut également être obtenue de façon plus naturelle en utilisant la définition entière usuelle. C'est la définition proposée par Grünwald-Letnikov [11].

Elle est plus adéquate au calcul numérique de la dérivation non entière en effet partant de la dérivée première.

La dérivée d'ordre $\alpha > 0$ de G-L est donnée par:

$${}^{GL} D_t^\alpha F(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{(t-t_0)/h} (-1)^j \binom{\alpha}{j} F(t - jh) \quad (1.8)$$

Où : h est la période d'échantillonnage et les coefficients $\binom{\alpha}{j}$ sont donnés par:

$$\binom{\alpha}{j} = \begin{cases} 1 & \text{si } j = 0 \\ \frac{(\alpha)(\alpha-1)\dots(\alpha-j+1)}{j!} & \text{si } j > 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

1.4 Système d'ordre fractionnaire

Comme dans le cas entier, il existe différents modèles qui représentent les systèmes d'ordre fractionnaire.

1.4.1 Equation différentielle d'ordre fractionnaire

Un système d'ordre non entier peut être représenté par une équation différentielle suivante:

$$\sum_{i=0}^n a_i D^{\alpha_i} y(t) = \sum_{j=0}^m b_j D^{\beta_j} u(t) \quad (1.10)$$

où $u(t)$, $y(t)$ désignent respectivement l'entrée et la sortie du système à l'instant t , D^α est l'opérateur de la dérivée d'ordre α .

a_i , b_j sont les coefficients de l'équation différentielle et $\alpha_i, \beta_j \in \mathbb{R}^+$.

1.4.2 Fonction de transfert d'ordre fractionnaire

L'application de la transformée de Laplace à l'équation (1.10), permet de déduire la fonction de transfert d'ordre non entier suivante:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^{\beta_m} + b_{m-1} s^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 s^{\beta_0}}{a_n s^{\alpha_n} + a_{n-1} s^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0 s^{\alpha_0}} \quad (1.11)$$

Dans le cas d'un système commensurable d'ordre α , la fonction de transfert généralisée de l'équation (1.11) devient.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^{m\alpha} + b_{m-1} s^{(m-1)\alpha} + \dots + b_0}{a_n s^{n\alpha} + a_{n-1} s^{(n-1)\alpha} + \dots + a_0} \quad (1.12)$$

1.4.3 La représentation d'état d'ordre fractionnaire

La représentation d'état d'ordre fractionnaire est représentée comme dans le cas entier, on remplace la dérivée d'ordre 1 par la dérivée fractionnaire d'ordre α . La représentation d'état est donnée par:

$$\begin{cases} D^\alpha x(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) + D u(t) \end{cases} \quad (1.13)$$

$$D^\alpha x(t) = [D^\alpha x_1(t) \ D^\alpha x_2(t) \ \dots \ D^\alpha x_n(t)]^T$$

tel que:

$x(t)$: vecteur d'état de dimension n .

$D^\alpha x(t)$: vecteur de la dérivée d'ordre α (avec $\alpha \in R^+$).

1.5 Commande d'ordre fractionnaire

L'application du calcul fractionnaire dans la modélisation, la commande et l'observation des systèmes a connu un grand succès.

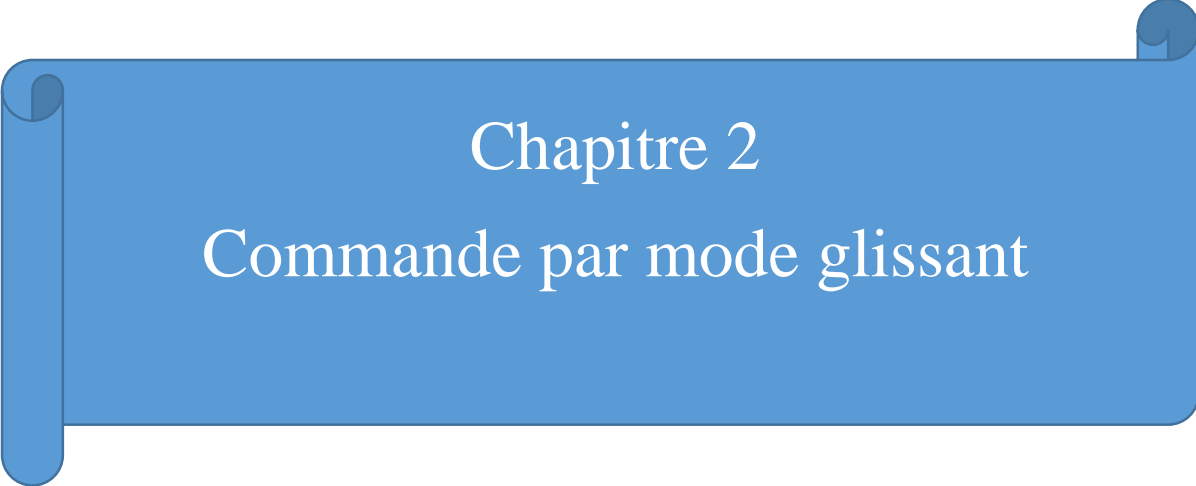
Les systèmes d'ordre fractionnaires sont tout particulièrement intéressants pour représenter les dispositifs dont le fonctionnement repose sur la diffusion d'une grandeur (champ, température, etc.). Ils sont de plus en plus fréquents dans les différents domaines de recherche. Par exemple, Schmidt et Drumheller ont montré que le courant qui traverse un condensateur est proportionnel à la dérivée non entière de la tension.

Dans le domaine de la commande plusieurs schémas ont été proposés, nous citons la Commande Robuste d'Ordre non entier (CRONE) [3], le régulateur $PI^\lambda D^\mu$ [12], qui est une généralisation du correcteur PID classique, comprenant une intégration fractionnaire d'ordre λ et une dérivation fractionnaire d'ordre μ , la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire [13]. Dans le domaine d'observation et du diagnostic plusieurs travaux ont été effectués dans la littérature [4-14].

L'intérêt majeur de la commande d'ordre fractionnaire est l'amélioration et l'optimisation des performances du système à commander en utilisant les concepts de la théorie des dérivées et des intégrales d'ordre fractionnaire. En effet, le réglage de l'ordre fractionnaire peut améliorer les caractéristiques du système.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques définitions de calcul de la dérivation et de l'intégration d'ordre fractionnaire, ensuite nous avons cité les différentes représentations des systèmes fractionnaires (équation différentielle, représentation d'état, la fonction de transfert). A la fin de ce chapitre, nous avons cité brièvement les travaux réalisés dans le cadre de la commande d'ordre fractionnaire.



Chapitre 2

Commande par mode glissant

2.1 Introduction

La commande par modes glissants des systèmes non linéaires a été largement étudiée et développée depuis son introduction. Celle-ci appartient à une classe plus large appelée commande à structure variable.

L'objectif de la commande par mode glissant est à l'aide d'une commande discontinue, de contraindre le système à évoluer au bout d'un temps fini et de maintenir sur une surface dite surface de glissement, où le comportement résultant correspond aux dynamiques souhaitées [9].

La technique des modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'un état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement.

L'avantage de cette commande est qu'elle est robuste aux perturbations et aux incertitudes de modèle.

Dans ce chapitre, nous présenterons le concept général de la commande par mode de glissement.

2.2 La théorie de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir des nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure. Dans la commande par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface appelée surface de glissement et les mouvements qui se produisent sont appelés mouvements de glissement [15].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes:

- Le mode de convergence (MC): est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase (x_1, x_2) , est tend vers la surface de commutation $S(x_1, x_2)=0$. Ce mode est caractérisé par une loi de commande discontinue et le critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG): est le mode durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x_1, x_2)=0$.

- Le mode de régime permanent (MRP): ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre, il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

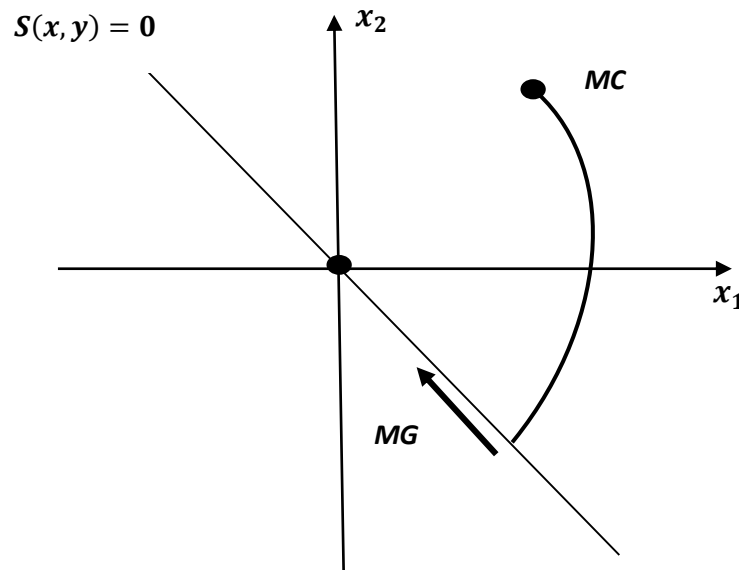


Figure 2.1 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

2.3 Conception de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant, à des avantages importants et multiples, tels que la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité de conception, la robustesse, etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties: une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Ce dernier est important dans la commande non linéaire, elle a pour rôle d'éliminer ou réduire les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

Pour illustrer la méthode de conception de la commande par mode glissant d'ordre un, nous considérons le cas d'un système non linéaire, défini par [16]:

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x).u \quad (2.1)$$

Avec:

$x \in R^n$: est le vecteur d'état.

$u \in R^m$: est le vecteur de commande.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes dépendantes l'une de l'autre.

- Choix de la surface de glissement.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- Détermination de la loi de commande.

2.3.1 Choix de la surface de glissement

La surface de glissement ou la fonction de commutation (switching function) représente le comportement dynamique désiré du système en boucle fermée. Elle peut être choisie linéaire ou non linéaire.

L'une des formes que la surface peut prendre est donnée par [9] :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (2.2)$$

Avec :

λ : Constante positive.

r : est le degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

$e(x) = x - x_d$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.

x : variable d'état.

x_d : valeur désirée.

Une autre forme de la surface est la suivante :

$$S(x) = \sum_{i=1}^n c_i (x_i - x_{id}) \quad (2.3)$$

La dynamique de convergence est assurée par les choix des coefficients c_i .

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro ($S(x)=0$), dont l'unique solution est ($e(x)=0$) pour un choix convenable des paramètres.

2.3.2 Conditions de convergence et d'existence

Les conditions de convergence et d'existence sont deux critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester

indépendamment de la perturbation. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence.

2.3.2.1 La fonction discrète de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée par Emilyanov et Utkin. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &> 0 \quad \text{si} \quad s(x) < 0 \\ \dot{s}(x) &< 0 \quad \text{si} \quad s(x) > 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Cette condition peut être formulée comme suit:

$$\dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (2.5)$$

2.3.2.1 La fonction de Lyapunov

L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir la commande u . La fonction de Lyapunov est définie comme suit:

$$v(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (2.6)$$

La dérivée de cette fonction est:

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) s(x) \quad (2.7)$$

Pour que la fonction $v(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit strictement négative. Ceci n'est vérifié que si la condition suivante est vérifiée:

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (2.8)$$

L'équation (2.8) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $s^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux cotés de cette surface. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

2.3.3 Calcul de la commande

Il faut déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. Si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée.

La partie continue en effet, amène à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue.

En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constitué de deux parties, une concernant la linéarisation (u_{eq}) et l'autre stabilisante (u_n).

On écrit:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.9)$$

Tel que:

u_{eq} : La commande proposée par Utkin, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $s(x)=0$, la commande équivalente est déduite en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{s}(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander, elle peut être comme une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{max} et u_{min} .

u_n : est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

Pour mettre en évidence le calcul de la commande, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (2.1). Il s'agit de trouver l'expression de la commande u .

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2.10)$$

Il en résulte:

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x) + g(x)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x)u_n \quad (2.11)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente:

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} f(x) \quad (2.12)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que:

$$\frac{\partial S}{\partial x} g(x) \neq 0$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (2.11) nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface:

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x) u_n \quad (2.13)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (2.6) devient:

$$\frac{\partial S}{\partial x} g(x) u_n S(x) < 0 \quad (2.14)$$

Afin de satisfaire cette condition le signe de u_n doit être opposé à celui de

$$s(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x)$$

La forme la plus simple que peut prendre la commande discontinue est celle d'un relais (figure2.2).

$$u_n = K \text{sign } s(x) \quad (2.15)$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} g(x)$.

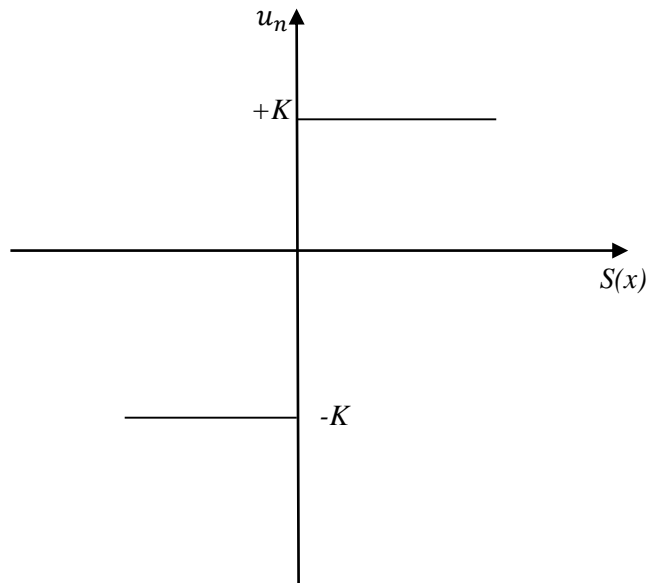


Figure 2.2 Représentation de la commande discontinue

2.3.3.1 Principe de la commande de glissement dans le cas linéaire

Un cas particulièrement important du fait de sa simplicité est celui où la dynamique du système et celle de la surface de glissement sont supposées linéaires. Le modèle du système est alors:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.16)$$

Avec :

$$x \in R^n \text{ et } u \in R^m$$

La surface de glissement est:

$$s(x) = C x(t) \quad (2.17)$$

Avec: $C \in R^{m \times n}$

Si le système est en régime glissant alors:

$$s(x) = C x(t) = 0 \quad \forall t \geq t_s$$

Avec t_s est le temps durant lequel le mode de glissement est atteint. En dérivant par rapport au temps et en utilisant la même démarche que précédemment on obtient:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= CAx(t) + CBu_{eq}(t) = 0 & \forall t \geq t_s \\ u_{eq}(t) &= -CB^{-1} CA x(t) \\ u_{eq}(t) &= Mx(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

telle que:

$$M = -(CB)^{-1} CA \quad (2.19)$$

Avec $M \in R^{m \times n}$ est la matrice de retour alors, le modèle du comportement du système sur la surface de glissement est:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu_{eq}(t) \\ \dot{x}(t) &= [AI - B(CB)^{-1}C] Ax(t) = A_{eq}x(t) \quad \forall t \geq t_s \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tel que:

$$A_{eq} = [AI - B(CB)^{-1}C]$$

A : est appelée la matrice dynamique équivalente en glissement.

La matrice A_{eq} à un certain nombre de propriétés, m valeurs propres nulles et $n-m$ valeurs propres non nulles, définissant les dynamiques de glissement.

La loi de commande discontinue est déterminée pour satisfaire les conditions de convergence. Elle est donnée par l'équation (2.15).

2.4 Synthèse de la surface de glissement

Dans cette partie, nous ne représenterons que le cas entièrement linéaire pour des raisons de simplification. Cependant, les développements présentés peuvent être étendus au modèle non linéaire (2.1).

Considérons le système linéaire (2.16), la dynamique en mode de glissement est donnée par l'équation (2.20). Cette dynamique est indépendante de la loi de commande non linéaire. Elle dépend uniquement du choix de la matrice C , ce qui en retour détermine la matrice M de la commande équivalente (2.17). Afin de simplifier la détermination de la matrice C , il est toujours souhaitable de mettre le système initial sous une forme canonique particulière, on distingue la forme dite forme régulière [17].

Soit T une matrice de transformation orthogonale de dimension $n \times n$, telle que :

$$TB = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Avec:

$B_2 \in R^{m \times n}$ est non singulière. Soit la transformation $Z = Tx$, alors le système original (2.16) est transformé à la forme régulière suivante:

$$\dot{Z}(t) = TAT^{-1}Z(t) + TBu(t) \quad (2.22)$$

Supposons que :

$$Z^T = [Z_1 \quad Z_2]^T \quad Z_1 \in R^{n-m}, Z_2 \in R^m.$$

Alors:

$$\dot{Z}_1(t) = A_{11}Z_1(t) + A_{12}Z_2(t) \quad (2.23)$$

$$\dot{Z}_2(t) = A_{21}Z_1(t) + A_{22}Z_2(t) + B_2u \quad (2.24)$$

où:

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

La surface de glissement devient alors :

$$C_1Z_1(t) + C_2Z_2(t) = 0$$

où:

$$CT^{-1} = [C_1 \quad C_2] \quad (2.25)$$

D'où: $Z_2(t) = -FZ_1(t)$

Avec:

$$F = C_2^{-1}C_1 \quad (2.26)$$

Le mode glissant idéal est régi par:

$$\dot{Z}_1 = (A_{11} + A_{12}F)Z_1$$

où l'ordre du système est réduit à n-m.

La synthèse d'un mode glissant stable entraîne donc la détermination d'une matrice de retour d'état stabilisante F sur le système réduit pour lesquelles différentes méthodes sont possibles :

- Placement de pôles.
- Techniques classiques d'optimisation quadratique.

Une fois la matrice F est déterminée, on peut calculer la matrice C et souvent on prend

$$C_1 = F \text{ et } C_2 = I, \text{ donc } C = [F \quad I]T$$

où T est la matrice de transformation prédéfinie.

2.5 Phénomène de réticence

La commande discontinue u_n , du fait d'une fréquence de commutation finie, ne génère pas un mode glissant idéal, des oscillations à haute fréquence apparaissent dans un voisinage de la surface, connues sous le nom de réticence ou chattering en anglais.

Ce phénomène est le principal désavantage de la commande par mode glissant d'ordre un, il peut exciter des dynamiques non modélisées conduisant à l'instabilité [18].

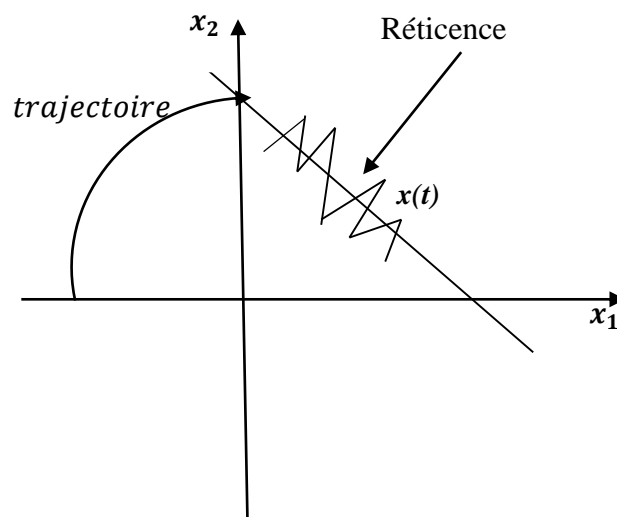


Figure 2.3 Phénomène de chattering.

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de réticence (chattering). L'une d'entre elles consiste à utiliser des fonctions sigmoïdes, telle que la fonction \tanh , \arctan ou la fonction de saturation représentées comme suit:

- **La fonction de saturation**

Elle consiste à remplacer la fonction $\text{sign}(s)$ par la droite de pente $\frac{1}{\varepsilon}$; à l'intérieur d'une bande de largeur 2ε située de part et l'autre de la surface de glissement, la discontinuité étant conservée à l'extérieur de cette bande. Son expression est donnée par [12]:

$$\text{Sat}(s, \varepsilon) = \begin{cases} \frac{s}{\varepsilon} & \text{si } |s| \leq \varepsilon \\ \text{sign}(s) & \text{si } |s| > \varepsilon \end{cases}$$

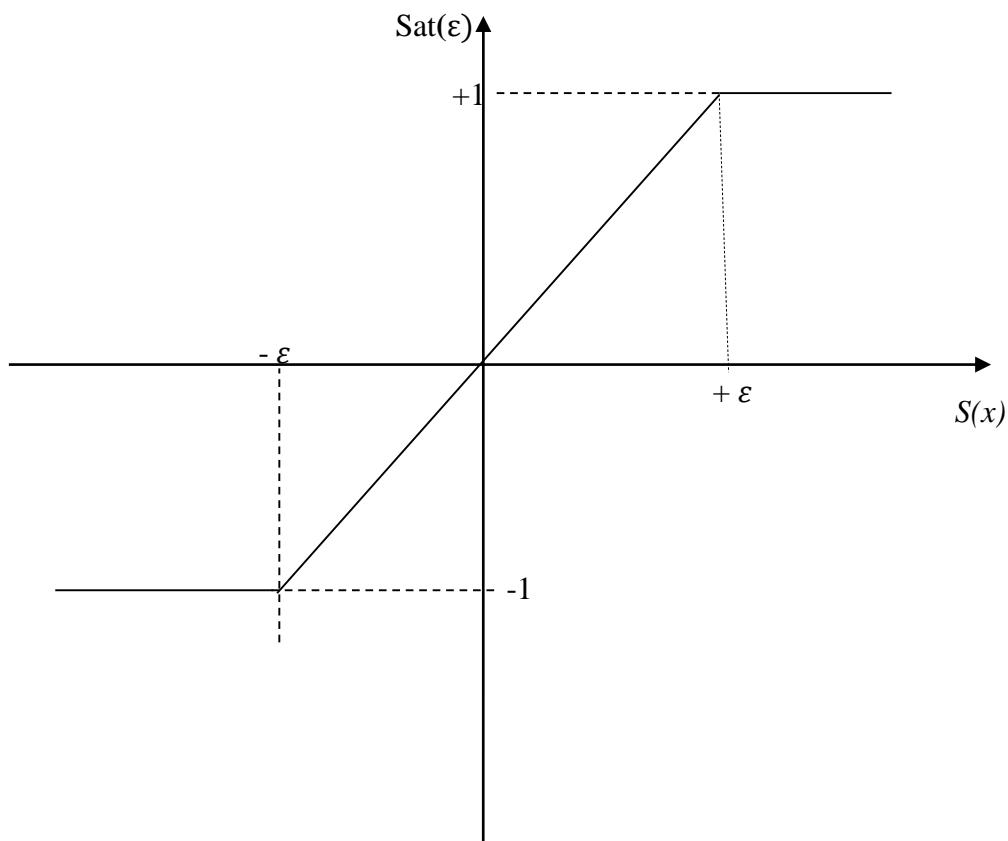


Figure 2.4 Représentation de la fonction Sat

- **La fonction pseudo-signe [15]**

$$v(s, \varepsilon) = \frac{s}{|s| + \varepsilon}$$

- **La fonction avec tangente [15]**

$$v(s, \varepsilon) = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$$

- **La fonction tangente hyperbolique [15]**

$$v(s, \varepsilon) = \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$$

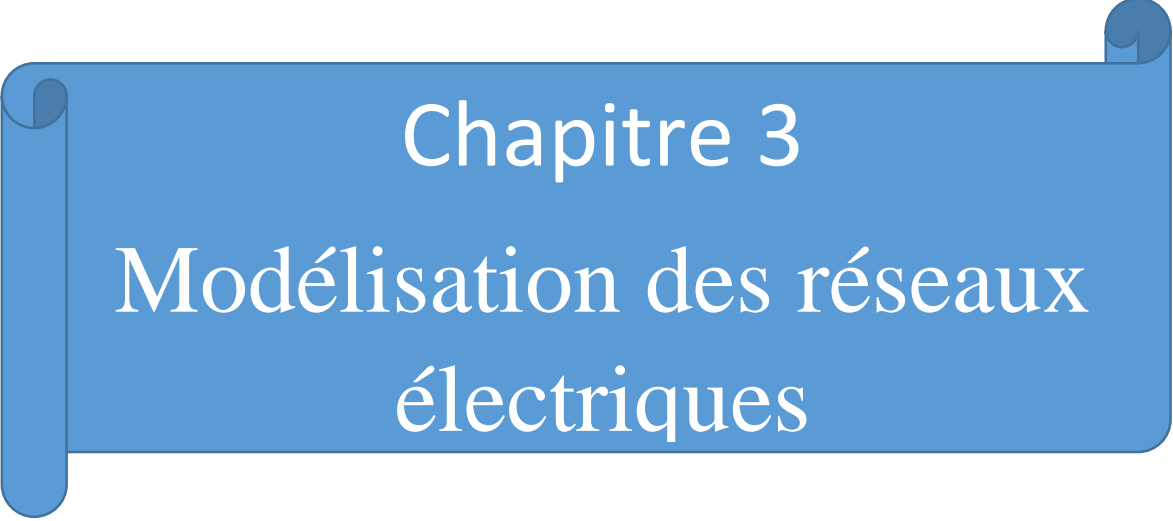
- **La fonction tangente sigmoïde [15]**

$$v(s) = \frac{1}{1+e^{-2s}}$$

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le principe de la commande par mode glissants qui consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement et la conception de la commande est effectuée en trois étapes principales :

- Le choix de la surface de glissement.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- Détermination de la loi de command

A blue scroll graphic with a white border, featuring a rolled-up top edge and a tab on the left side. The text is centered on the scroll.

Chapitre 3

Modélisation des réseaux électriques

3.1 Introduction

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 une autre grâce aux transformateurs [19].

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[20] .

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation des réseaux électriques. L'objectif est d'adopter des modèles pratiques pour analyser et dimensionner le réseau électrique.

3.2 Les composants d'un réseau électrique

Les différents composants d'un réseau électrique sont généralement: les générateurs d'énergie électrique, les lignes de transport, les équipements de compensation d'énergie réactive ainsi que les transformateurs de puissance et les charges électriques.

3.2.1 Les générateurs

Un générateur est représenté par une source de tension constante qui injecte au niveau du nœud auquel il est connecté une puissance active P_g et une puissance réactive Q_g , P_g est constante durant tout le calcul, par contre Q_g varie entre Q_{gmin} et Q_{gmax} afin de maintenir une tension constante aux bornes de l'alternateur. [19]



Figure 3.1 Le schéma d'un générateur.

3.2.2 Les lignes de transmission

Chaque conducteur est caractérisé par:

- Sa résistance 'R' en Ω /m.
- Son inductance 'L' en H/m.

- Sa capacité 'C' en F/m.

Les lignes sont représentées par leurs schémas équivalents en π (figure 3.2).

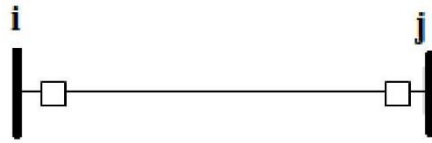


Figure 3.2 Le schéma d'une ligne de transmission.

3.2.3 Les transformations de puissance

Le transformateur est représenté par sa matrice admittance, les grandeurs caractéristiques sont le rapport de transformation ($a e^{j\phi}$) qui peut être complexe ou non et l'impédance de fuite donnée comme suit:

$$Z = R + j X \quad (3.1)$$

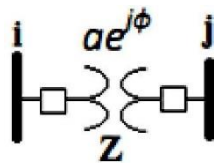


Figure 3.3 Le schéma d'un transformateur

3.2.4 Les charges

Une charge est modélisée par une impédance qui consomme une puissance active constante P_L et une puissance réactive constante Q_L (figure 3.4).

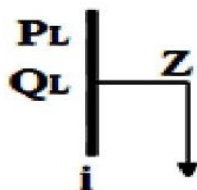


Figure 3.4 Le schéma d'une charge.

3.2.5 Consommateurs

Le rôle de réseau d'énergie est de délivrer l'énergie électrique dans une forme convenable à l'utilisateur.

Il y'a trois critères pour juger la qualité de l'électricité :

- l'amplitude du voltage doit être constante.
- la fréquence du voltage doit être constante.
- l'obtention d'un signal idéal sous forme sinusoïdale.

3.3 Modélisation

Dans cette partie nous allons modéliser les constituants des réseaux électriques, à savoir les générateurs, les lignes de transmissions et les charges.

3.3.1 Modèle de la partie mécanique

Les équations mécaniques de la machine synchrone sont bien déterminées. Pour les obtenir, nous utilisons les deux hypothèses suivantes:

- la vitesse du rotor de la machine ne varie pas trop par rapport à celle du synchronisme.
- la puissance mécanique reste constante.

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

De ces hypothèses, nous pouvons formuler les deux équations différentielles du premier ordre suivantes:

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

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} (p_m - p_e) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) \quad (3.3)$$

Avec:

- δ : l'angle électrique.
- ω : vitesse instantanée.
- ω_0 : vitesse de synchronisme.
- H : constante d'inertie.
- D : coefficient d'amortissement.
- p_m : puissance mécanique.

- p_e : puissance électrique générée.

3.3.2 Modèle de la partie électrique

Le modèle de la partie électrique est difficile à le formuler à cause de la distribution des effets magnétiques dans l'espace et dans le temps. Cela est dû à la rotation du rotor et à la géométrie des bobines et leurs emplacements dans la machine.

3.3.2.1 Principe de la transformation de Park

La transformation de Park est définie par une matrice ' P ' qui s'applique aux grandeurs statoriques pour obtenir les grandeurs de Park correspondantes. La matrice de Park est donnée par:

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3.2.2 Equations électriques de la machine

Pour pouvoir développer le modèle électrique équivalent de la machine, il est nécessaire de faire certaines hypothèses. Ces hypothèses classiques sont les suivantes:

- On considère une distribution sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer créées par les bobinages statoriques et rotoriques.
- On néglige les phénomènes de saturation et d'hystérésis magnétique.
- On néglige les pertes dans l'entrefer de la machine.
- On néglige l'effet de peau (en particulier dans les barres du rotor).
- On néglige l'effet de la température sur la valeur des résistances.

On donne sur la figure 3.5, une représentation symbolique de la machine bipolaire équivalente. Le stator est composé de trois bobinages déphasés de $2\pi/3$ dans l'espace. La cage du rotor peut être modélisée par deux enroulements en quadrature, l'un placé suivant l'axe d (axe de faible entrefer) et l'autre suivant l'axe q . Cette représentation simplifiée du

rotor ne permet pas d'accéder à la connaissance du courant circulant effectivement dans chaque nœud mais conduit à une traduction assez fidèle de l'influence des nœuds rotoriques sur le comportement de la machine. L'angle θ représente la position mécanique du rotor et p le nombre de paires de pôles. ("d" pour "direct", "q" pour "quadrature") [20].

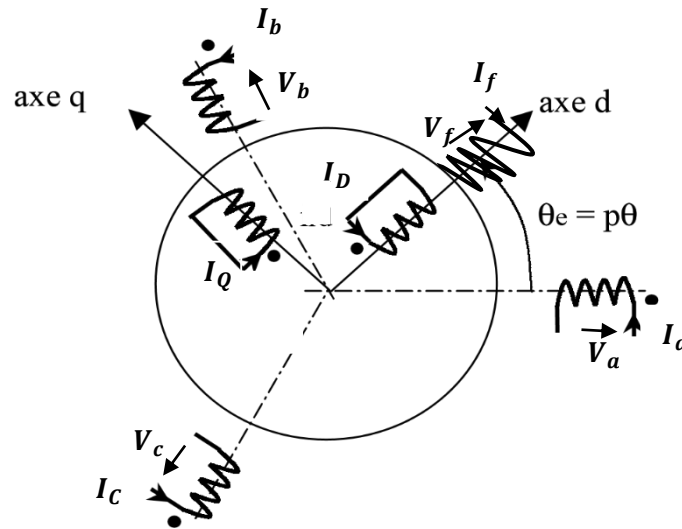


Figure 3.5 Représentation symbolique de la machine synchrone

La transformation de Park étant appliquée à la machine synchrone, les équations qui expriment les flux dans les différents enroulements de la machine sont données par les équations suivantes:

$$V_d = -R I_d - \omega \Phi_d - \frac{d\Phi_d}{dt}$$

$$V_q = -R I_q + \omega \Phi_q - \frac{d\Phi_q}{dt}$$

$$V_f = -r_f I_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \quad (3.5)$$

$$0 = r_D I_D + \frac{d\Phi_D}{dt}$$

$$0 = r_Q I_Q + \frac{d\Phi_Q}{dt}$$

Avec:

- V_q, V_d, V_f : représentent les tensions aux bornes des enroulements d, q, f .
- $\Phi_d, \Phi_q, \Phi_f, \Phi_D, \Phi_Q$: les flux dans les enroulements d, q, f, D, Q .
- I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q : représentent respectivement les courants dans les enroulements d, q, f, D, Q .

Les équations qui expriment les flux dans les différents enroulements de la machine peuvent être données sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & KM_f & KM_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & KM_Q \\ KM_f & 0 & L_f & KM_R & 0 \\ KM_D & 0 & KM_R & L_D & 0 \\ 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Avec:

- L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q : représentent respectivement les inductances propres des enroulements d, q, f, D, Q .
- M_d : inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et les enroulements de l'axe direct.
- M_q : inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et les enroulements de l'axe en quadratique.

3.3.3 Modèle électrique

Nous allons faire un changement de variables qui permet d'obtenir les équations électriques de la machine.

$$E_q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\omega_0 \frac{KM_q}{L_q} \right) \Phi_q \quad (3.7)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\omega_0 \frac{KM_f}{L_f} \right) \Phi_f \quad (3.8)$$

$$E_{fd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\omega_0 \frac{KM_f}{r_f} \right) V_f \quad (3.9)$$

Avec:

- E_q : la f.e.m.transitoire d'axe direct.
- E : la f.e.m. transitoire à vide.
- E_{fd} : la f.e.m d'excitation.

La tension terminale de la machine synchrone s'écrit, pour la composante directe.

$$V_d = x_q I_q \quad (3.10)$$

Et pour la composante quadrature:

$$V_q = E'_q - x'_d I_d \quad (3.11)$$

En notation complexe, la tension terminale aux bornes de la machine s'écrit sous la forme suivante:

$$\bar{V}_t = V_q + j V_d \quad (3.12)$$

$$\text{Avec : } V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (3.13)$$

Du même pour le courant dans le stator:

$$\bar{I} = I_q + j I_d \quad (3.14)$$

- V_d : composante de la tension terminale sur l'axe d .
- V_q : 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 .
- x'_d : réactance transitoire sur l'axe d .

Ainsi l'expression complexe de la tension terminale devient:

$$\bar{V}_t = E'_q - jx'_d \bar{I} - j(x_q - x'_d)I_q \quad (3.15)$$

On donne le schéma équivalent de la machine synchrone suivant:

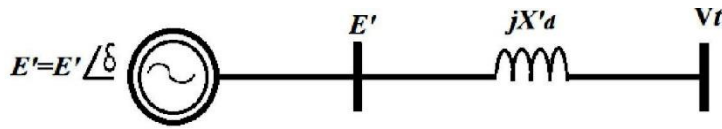


Figure 3.6 Modèle transitoire d'un générateur synchrone.

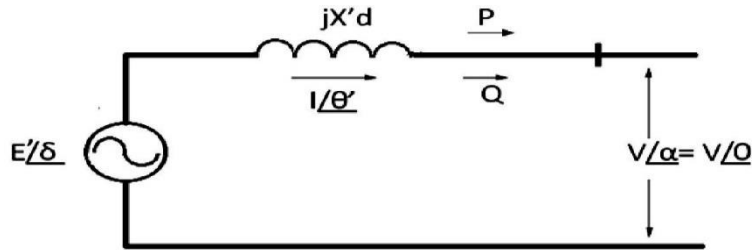


Figure 3.7 Modèle simplifié de la machine synchrone.

Avec le diagramme des phases de la machine synchrone:

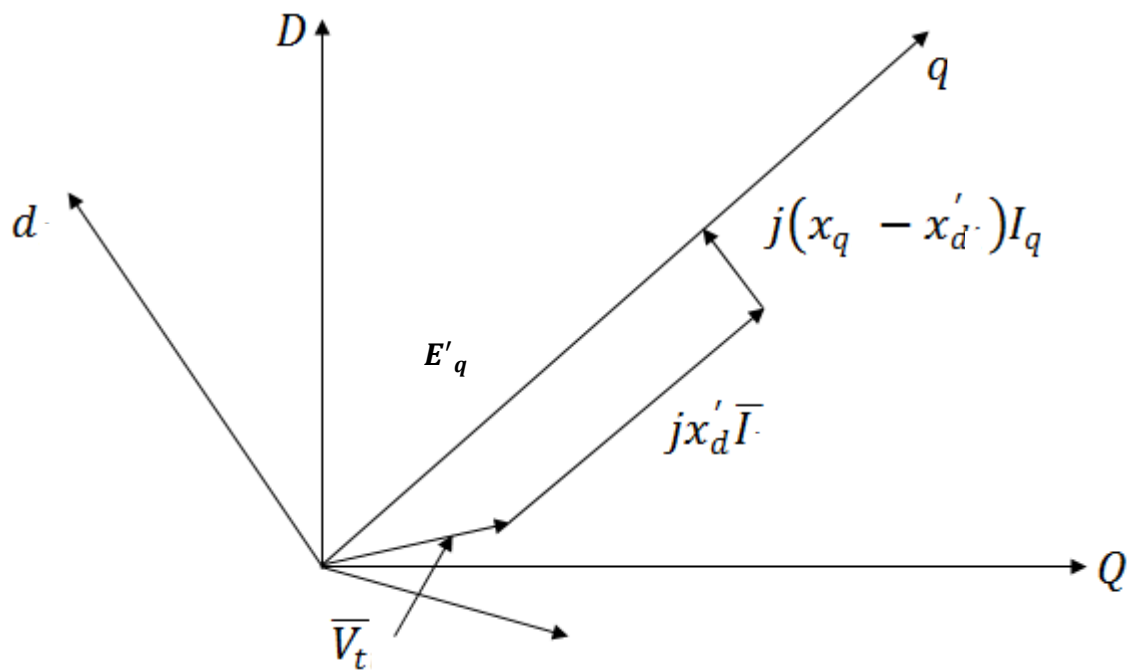


Figure 3.8 Diagramme des phases de la machine synchrone.

Dans ce qui suit, nous allons considérer seulement l'axe q et le régime transitoire pour réduire le nombre d'équations différentielles de la partie électrique en une seule équation.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) I_d) \tag{3.16}$$

La puissance électrique développée est:

$$p_{ei} = E'_{qi} I_{qi} \quad (3.17)$$

3.3.4 La matrice d'admittance

L'établissement du modèle a pour but de déterminer les équations algébriques représentant les interconnexions entre les lignes, les générateurs les transformateurs et les charges.

Le réseau électrique peut être décrit sous la forme matricielle suivante [21]:

$$[I] = [Y] [V] \quad (3.18)$$

où:

- $[I]$: le vecteur des courants injectés aux nœuds du réseau de dimension $(n+m \times I)$.
- $[V]$: le vecteur des tensions aux nœuds du réseau de dimension $(n+m \times I)$.
- $[Y]$: la matrice d'admittance du réseau de dimension $(n+m \times n+m)$.
- m : le nombre de générateur.
- $n+m$: le nombre des nœuds.
- La matrice admittance $[Y]$ se compose de termes diagonaux $[Y_{ii}] = \text{somme}(y_{ij})$ et des termes non-diagonaux $[Y_{ij}] = -y_{ij}$.
- Les termes $[Y_{ii}]$, (self admittance), représentent la somme de toutes les admittances connectées aux nœuds i .
- Les termes $[Y_{ij}]$, (l'admittance mutuelle), représentent la somme de toutes les admittances joignant les nœuds i et j .

Avec:

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (3.19)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.20)$$

- Les phénomènes qui régissent le fonctionnement des réseaux électriques peuvent être étudiés par les lois utilisées dans l'étude des régimes permanents. Pour calculer La matrice d'admittance, les lignes de transmission, les transformateurs et les charges opèrent généralement sous des régimes équilibrés ce qui permet l'utilisation des schémas par phase pour l'étude de ces réseaux avec une très bonne approximation.

3.3.4.1 La matrice d'admittance du réseau avant le défaut

La matrice d'admittance du réseau avant le défaut doit être calculée de la façon suivante:

- Toutes les impédances doivent être converties en admittances.
- La diagonale Y_{ii} de la matrice d'admittance est formée par l'addition de toutes les admittances connectées au nœud i .
- Les éléments Y_{ij} sont les valeurs négatives de l'admittance connectée entre le nœud i et le nœud j .

3.3.4.2 La matrice d'admittance pendant le défaut

La matrice d'admittance du réseau pendant le défaut doit être calculée de la façon suivante:

- Prendre la matrice d'admittance avant le défaut (déjà calculée).
- Mettre des zéro dans toutes les lignes et dans toutes les colonnes qui correspondent à la barre où s'est produit le défaut.

3.3.4.3 La matrice d'admittance après le défaut

La matrice d'admittance du réseau après le défaut doit être calculée de la façon suivante:

- Prendre la matrice d'admittance avant le défaut (déjà calculée) ;
- Dans la matrice avant le défaut, soustraire les valeurs qui correspondent à la ligne qui a été ouverte pour enlever le défaut.

3.3.4.4 La formulation de la matrice d'admittance

La matrice d'admittance est un ensemble de données qui représente les relations d'admittance dans un réseau électrique. Autrement dit, dans un réseau électrique on peut représenter le lien existant entre les courants injectés aux nœuds et leur tension par la matrice d'admittance [22].

On a: $I = Y V$. Considérons la figure suivante :

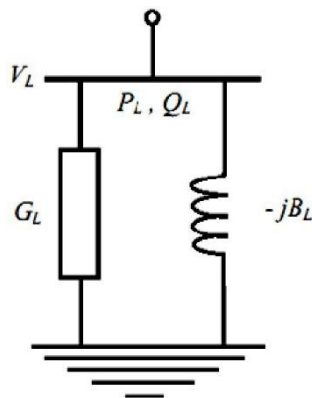


Figure 3.9 Modèle Π d'une charge.

Soit:

$$S_l = P_l + jQ_l \quad (3.21)$$

Tel que:

' S_l ' la puissance apparente de la charge.

' P_l ' la puissance active de la charge.

' Q_l ' la puissance réactive de la charge.

Par conséquent, l'admittance de la charge est:

$$Y_l = \frac{P_l}{V_l^2} - j \frac{Q_l}{V_l^2} \quad (3.22)$$

Considérons le modèle π d'une ligne de transmission donnée par la figure suivante:

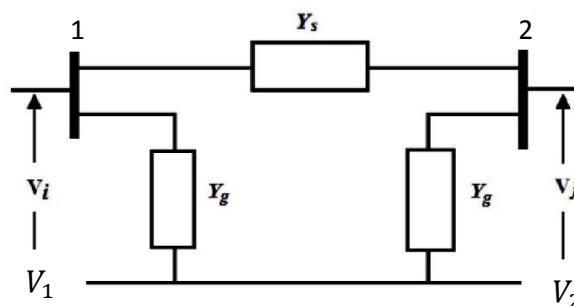


Figure 3.10 Modèle π d'une ligne de transmission.

La matrice admittance est calculée comme suit:

$$I_1 = y_g v_1 + y_s(v_1 - v_2) \quad (3.23)$$

$$I_2 = y_g v_2 + y_s(v_2 - v_1) \quad (3.24)$$

On écrit les équations sous la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_g + y_s & y_s \\ -y_s & y_g + y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Dans le cas de m générateurs et n + m barres l'équation (3.25) devient:

$$\begin{bmatrix} I_m \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{mm} & y_{mn} \\ y_{nm} & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Alors:

$$I_m = y_{mm} v_m + y_{mn} v_n$$

$$I_n = y_{nm} v_m + y_{nn} v_n \quad (I_n = 0) \quad (3.27)$$

3.3.5 Modèle d'un réseau multi-machines

Le modèle d'un réseau électrique à m générateurs est le suivant:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_0}{2H_i} (p_{mi} - p_{ei}) - \frac{D_i}{2H_i} (\omega_i - \omega_0) \quad (3.28)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T_{doi}} (E_{fdi} - E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di})$$

Avec:

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^m E'_{qj} (B_{ij} \cdot \sin(\delta_{ij}) - G_{ij} \cdot \cos(\delta_{ij}))$$

$$I_{di} = -\sum_{j=1}^m E'_{qi} (B_{ij} \cdot \cos(\delta_{ij}) - G_{ij} \cdot \sin(\delta_{ij}))$$

$$p_{ei} = E'_{qi} I_{qi}$$

où:

i : Indique le $i^{\text{ème}}$ générateur. ($i=1, m$)

δ_i : L'angle interne du rotor.

ω_i : vitesse de rotation électrique du générateur en (rad /s).

H_i : Constante d'inertie de la masse tournante.

D_i : Coefficient d'amortissement.

E'_{qi} : tension transitoire interne du générateur i .

E_{fdi} : Tension d'excitation.

T'_{doi} : Constante de temps transitoire de l'axe direct en circuit ouvert.

P_{ei} : Puissance électrique.

P_{mi} : Puissance mécanique.

ω_0 : vitesse nominale de rotation électrique du générateur en (rad/s).

La tension de sortie du générateur V_{ti} est donnée comme suit:

$$V_{di} = x_{qi} I_{qi} \tag{3.29}$$

$$V_{di} = E'_{qi} - x'_{di} I_{di} \tag{3.30}$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \tag{3.31}$$

Le modèle (3.28) peut être écrit sous la forme suivante:

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x) u(t) \quad (3.32)$$

$$y(t) = h(x)$$

- $x(t) \in R^n$, représente le vecteur d'état tel que $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$
- $u(t) \in R^m$, représente le vecteur d'entrée tel que $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$.
- $y(t) \in R^p$, représente le vecteur de sortie tel que $y = [y_1, y_2, \dots, y_p]^T$.

3.3.6 La stabilité des réseaux électriques

Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et des fréquences associées [23].

Il faut distinguer:

3.3.6.1 La stabilité en régime statique

Le réseau a un comportement stable, c'est-à-dire que, soumis à de petites perturbations de faibles amplitudes, il revient à son point de fonctionnement initial ceci avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

3.3.6.2 La stabilité en régime dynamique

Dans ce cas, le réseau électrique est sujet à une perturbation rapide mais de faibles amplitudes.

L'étude de la stabilité dynamique consiste à:

- Envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte d'énergie mécanique, perte de source électrique, variation de charge, etc.
- Prédire le comportement du réseau face à ces perturbations.
- Préconiser les mesures à prendre, telles que le type de protection, réglage de relais, configurations, etc, pour éviter les modes de fonctionnement indésirables.

3.3.6.3 La stabilité en régime transitoire

Lorsque l'on passe d'un état stable statique à un autre, suite à une perturbation durable voulue ou non, ce changement d'équilibre s'accompagne d'un régime variable oscillatoire amorti considéré comme acceptable. D'autre part, l'instabilité en régime transitoire est observée lorsque, suite à une perturbation importante, le régime oscillatoire est divergent. Il

induit une perte d'alimentation ou un nouvel état stable inacceptable (ex: moteur qui « rampe ») [23].

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

Pour étudier la stabilité transitoire il faut :

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

3.3.7 La robustesse d'un réseau électrique

La robustesse du système électrique peut être définie comme la capacité d'un système électrique à garantir un état stable de fonctionnement face aux petites perturbations et aux incidents majeurs [24].

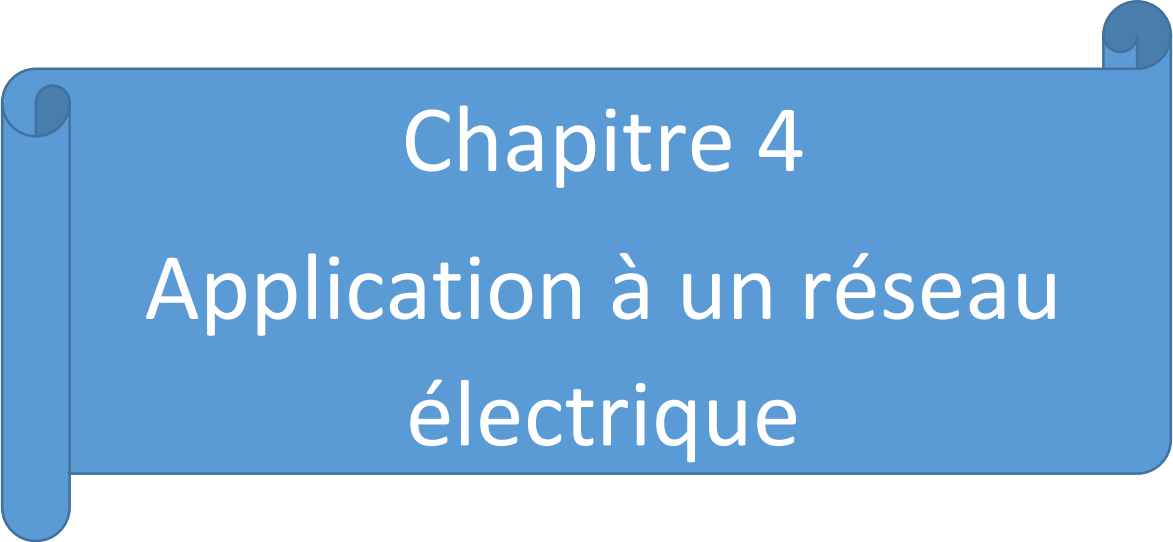
La robustesse inclut donc, des notions de systèmes électriques de différentes natures. De plus, elle tient compte des études à la fois statiques et dynamiques. En effet, le bon fonctionnement du système doit être garanti face aux nombreuses perturbations possibles.

3.7 Conclusion

Dans ce 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 m générateurs. Ce modèle permet l'évaluation de la stabilité transitoire.

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.

A blue scroll graphic with a white border, featuring a rolled-up top edge and a vertical strip on the left side. The text is centered on the scroll.

Chapitre 4

Application à un réseau électrique

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous appliquons la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire sur un réseau électrique. L'objectif est la régulation de l'angle, la vitesse ainsi que la tension de sortie et la puissance électrique autour des valeurs désirées.

4.2 Description du réseau électrique étudié

Le réseau électrique étudié est composé de trois générateurs, reliés entre eux par des lignes de transmission. La tension de générateur 3 est supposée constante. Chaque générateur représente un sous-système du système global.

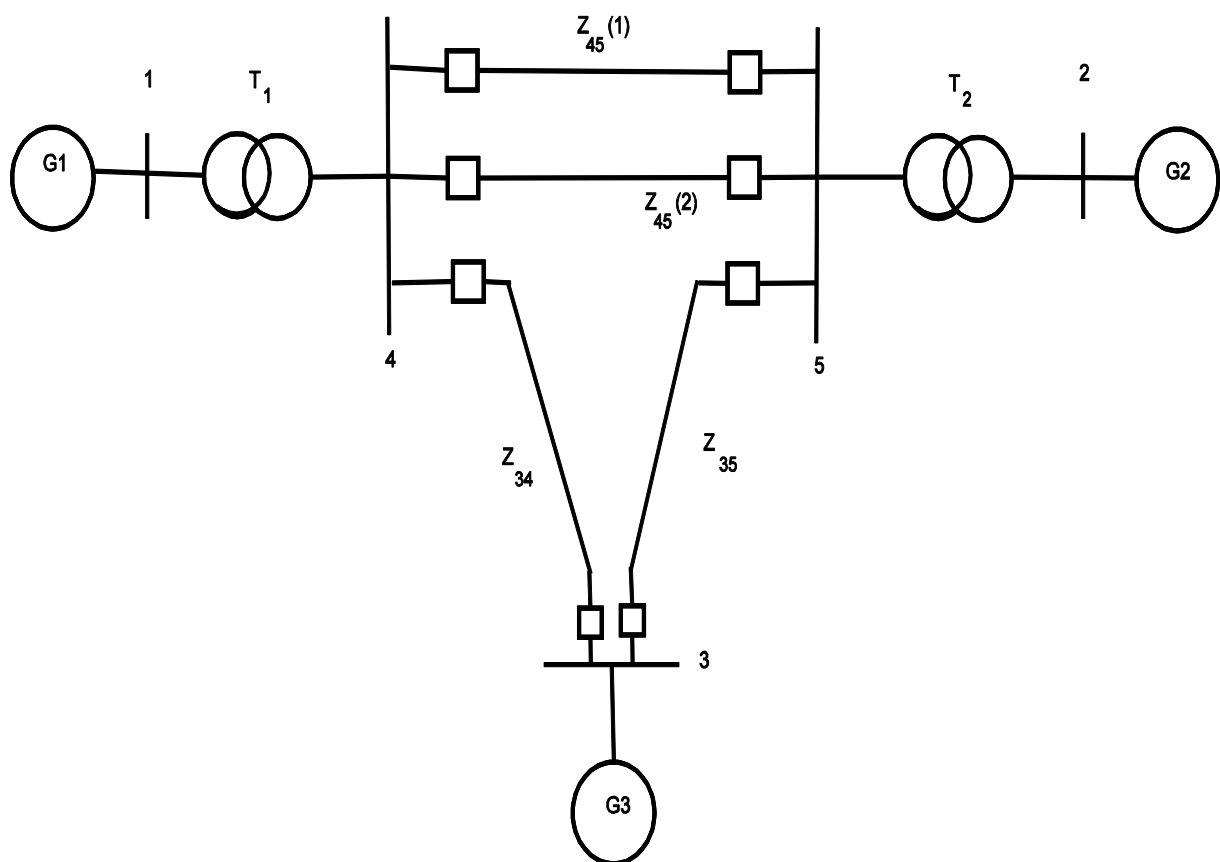


Figure 4.1 Réseau à trois générateurs.

L'objectif de notre commande est de maintenir la tension de sortie et la puissance électrique de chaque générateur à des valeurs désirées. Un test de robustesse vis-à-vis une perturbation sous la forme d'un court-circuit est considérée.

4.3 Modèle du réseau électrique

Le réseau décrit par la figure 4.1 est représenté par le modèle non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i \\ \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_0}{2H_i}(p_{mi} - p_{ei}) - \frac{D_i}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) \\ \frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T'_{doi}}(u_i - E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di})I_{di}) \end{cases} \quad i=1,2 \quad (4.1)$$

Avec:

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_0$$

$$I_{di} = -\sum_{j=1}^3 E'_{qj} B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$$

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^3 E'_{qj} B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$$

$$V_{ti} = \sqrt{(x'_{di} I_{qi})^2 + (E'_{qi} - x'_{di} I_{di})^2}$$

4.4 La linéarisation

Pour la synthèse de la commande par mode glissant fractionnaire nous utilisons l'approche de linéarisation par retour d'état, comme suit:

Soient:

$$z_{i1} = \delta_i$$

$$z_{i2} = \Delta\omega_i$$

$$z_{i3} = \Delta\dot{\omega}_i$$

Par ce changement de variables, on obtient:

$$\begin{cases} \dot{z}_{i1} = z_{i2} \\ \dot{z}_{i2} = z_{i3} \\ \dot{z}_{i3} = a_i(z) + b_i(z)u_i \end{cases} \quad (4.2)$$

En prenant:

$$u_i = (\gamma_i - a_i(z)) / b_i(z), \quad \text{avec } b_i(z) \neq 0$$

On obtient le modèle linéaire suivant:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{i1} \\ \dot{z}_{i2} \\ \dot{z}_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ z_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \gamma_i \quad (4.3)$$

Avec:

$$a_i(z) = \left(-\frac{D_i}{2 H_i} \right) z_{i3} + \left(\frac{\omega_0}{2 H_i T'_{doi}} \right) I_{qi} E'_{qi} + \left(\frac{\omega_0}{2 H_i T'_{doi}} \right) (x_{di} - x'_{di}) I_{di} I_{qi} \\ - \left(\frac{\omega_0}{2 H_i T'_{doi}} \right) E'_{qi} \dot{I}_{qi}$$

$$b_i(z) = \left(-\frac{\omega_0}{2 H_i T'_{doi}} \right) I_{qi}$$

$$\dot{I}_{qi} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^3 E'_{qj} B_{ij} \cos(z_{i1} - z_{j1}) z_{i2}$$

4.5 Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire

4.5.1 La surface de glissement

Considérons le système linéaire (4.3), comme nous l'avons déjà vu, la première étape dans la conception de la commande est le choix de la surface de commutation $s_i(z)$, donnée par:

$$s_i(z) = c_i z_i = c_i \begin{bmatrix} z_{i1} - z_{i1d} \\ z_{i2} \\ z_{i3} \end{bmatrix}$$

z_{i1d} : est le z_{i1} désiré (l'angle désiré).

$$s_i = c_{i1} (z_{i1} - z_{i1d}) + c_{i2} D^{-\eta} (z_{i1} - z_{i1d}) + c_{i3} D^{\alpha} (z_{i1} - z_{i1d})$$

$$s_i = c_{i1} (z_{i1} - z_{i1d}) + c_{i2} D^{-1-\eta} (\dot{z}_{i1} - \dot{z}_{i1d}) + c_{i3} D^{-2+\alpha} (\ddot{z}_{i1} - \ddot{z}_{i1d}) \quad (4.4)$$

4.5.2 Calcul des commandes γ_i

$$\dot{s}_i = 0$$

On a :

$$z_{i1d} = \text{constante}$$

$$\dot{z}_{i1d} = 0$$

$$\ddot{z}_{i1d} = 0$$

$$s_i = c_{i1} (z_{i1} - z_{i1d}) + c_2 D^{-1-\eta} \dot{z}_{i1} + c_{i3} D^{-2+\alpha} \ddot{z}_{i1}$$

Donc :

$$\dot{s}_i = c_{i1} \dot{z}_{i1} + c_{i2} D^{-1-\eta} \dot{z}_{i2} + c_3 D^{-2+\alpha} \dot{z}_{i3} = 0$$

$$\dot{s}_i = c_{i1} z_{i2} + c_{i2} D^{-1-\eta} z_{i3} + c_{i3} D^{-2+\alpha} \gamma_{ieq} = 0$$

On pose:

$$\gamma_{ieq} = -(c_{i1} D^{2-\alpha} z_{i2} + c_{i2} D^{1-\alpha-\eta} z_{i3}) / c_{i3} \quad (4.5)$$

Les vecteurs c_i sont réglés comme dans le cas de la commande par mode glissant classique, c'est-à-dire pour que les valeurs propres du système soient à partie réelle négative.

La commande discontinue u_{ni} est donnée par:

$$u_{ni} = K_i * \text{sign} (s_i) \quad (4.6)$$

La commande totale par mode glissant est donnée par:

$$\gamma_i = \gamma_{ieq} - u_{ni} \quad (4.7)$$

4.6 Les résultat de simulation

Les paramètres de simulation sont:

$$c_i = [94 \ 6 \ 1], K_i = 10, i = 1,2$$

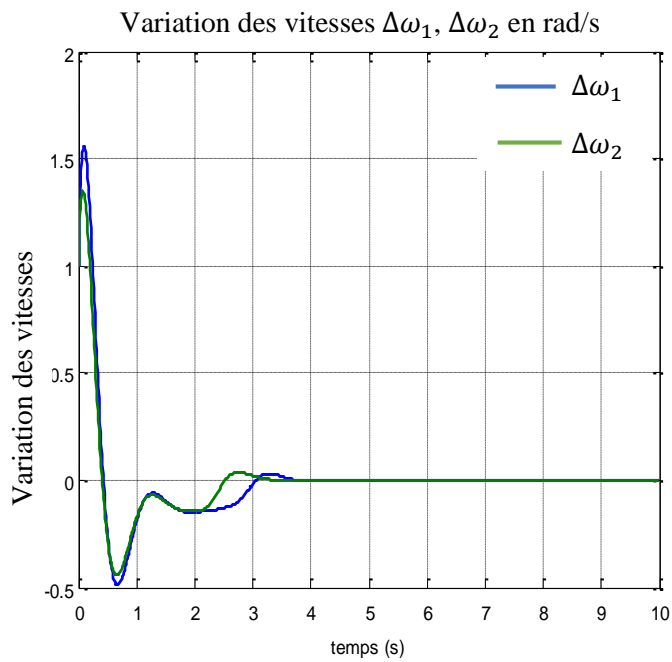
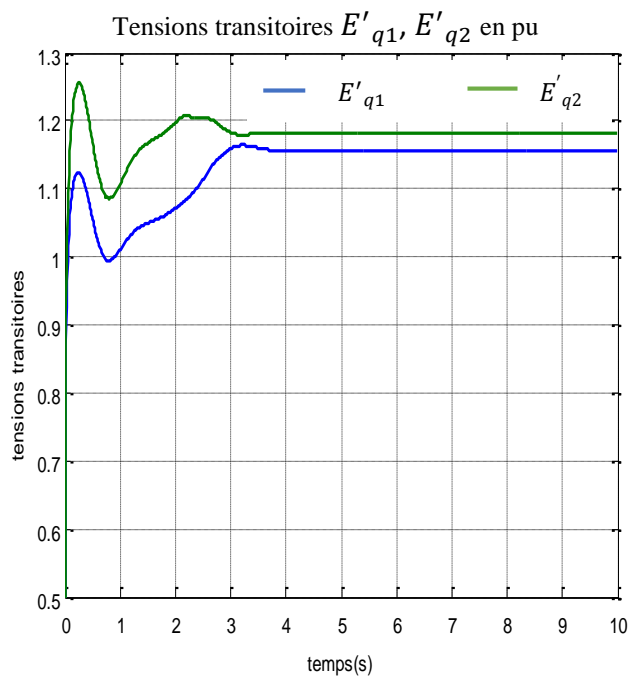
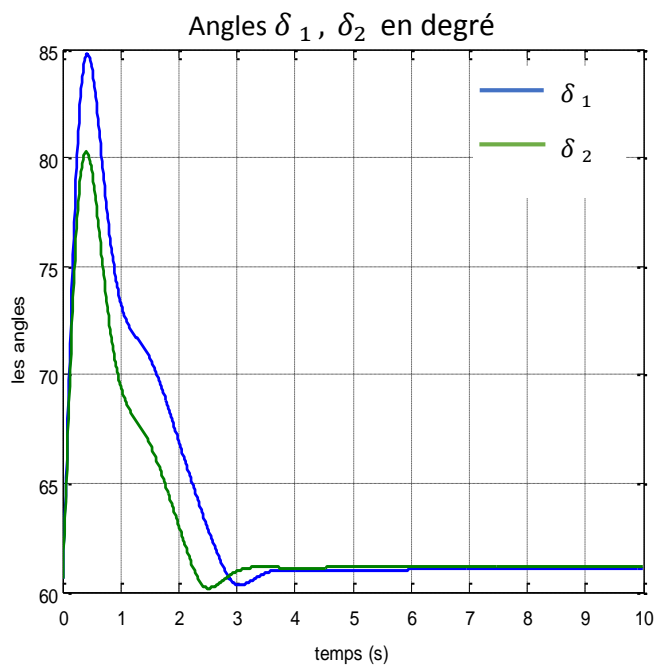
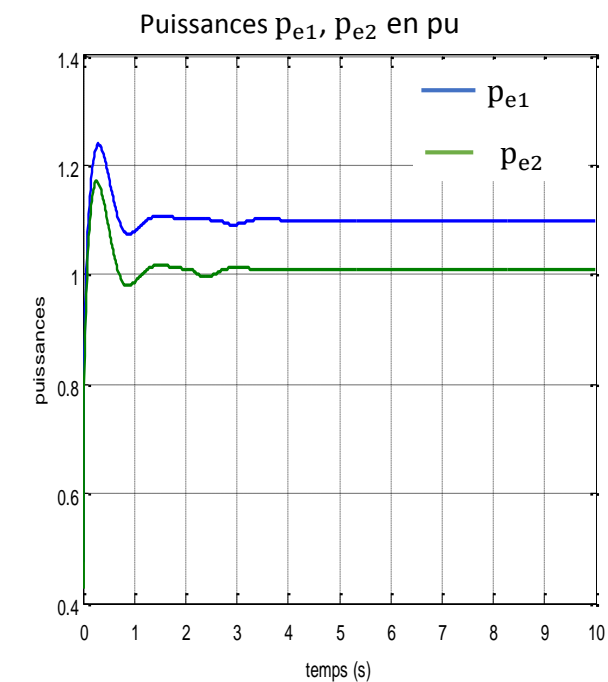
$$z_{11d} = 61.0429 \text{ en degré}$$

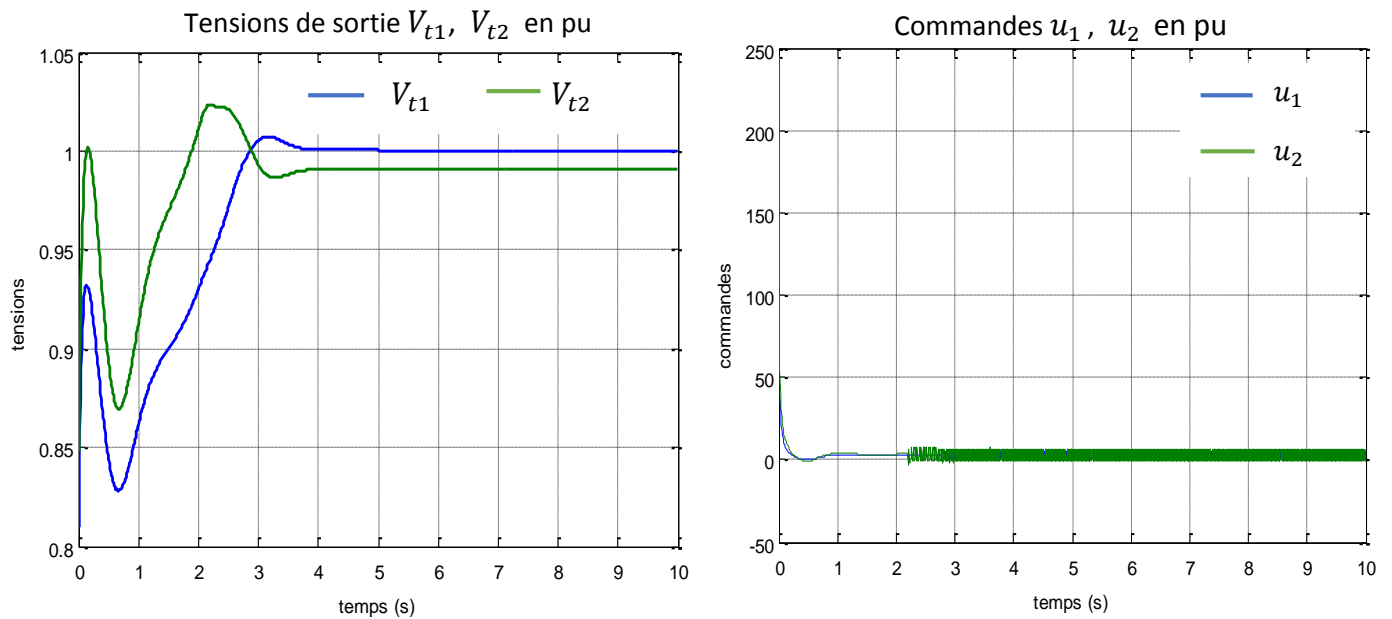
$$z_{21d} = 61.1403 \text{ en degré}$$

$$\eta = -1.5$$

$$\alpha = 1.9$$

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :





4.6.1 Interprétation des résultats de simulation

D'après les résultats de simulations, on remarque que toutes les variables (la vitesse angulaire, la puissance, la tension de sortie, l'angle) tendent rapidement vers les références désirées avec une meilleure précision de convergence.

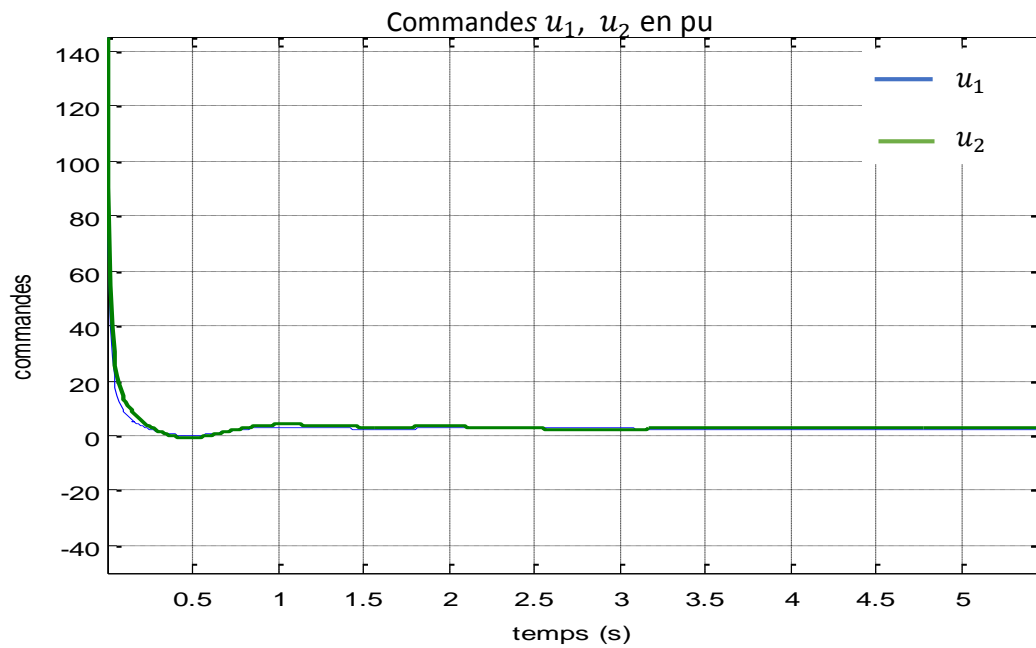
Remarque

Dans les figures précédentes, on remarque le phénomène de chattering dans le signal de commande qui est dû à la commande discontinue.

Afin de l'éliminer, nous avons remplacé la commande discontinue par:

$$u_{ni} = K_{ni} * \tanh(s_i)$$

Donc la figure de la commande devient:



4.7 Test de robustesse (court-circuit)

On a considéré un court-circuit dans la ligne 45⁽²⁾, comme le montre la figure suivante.

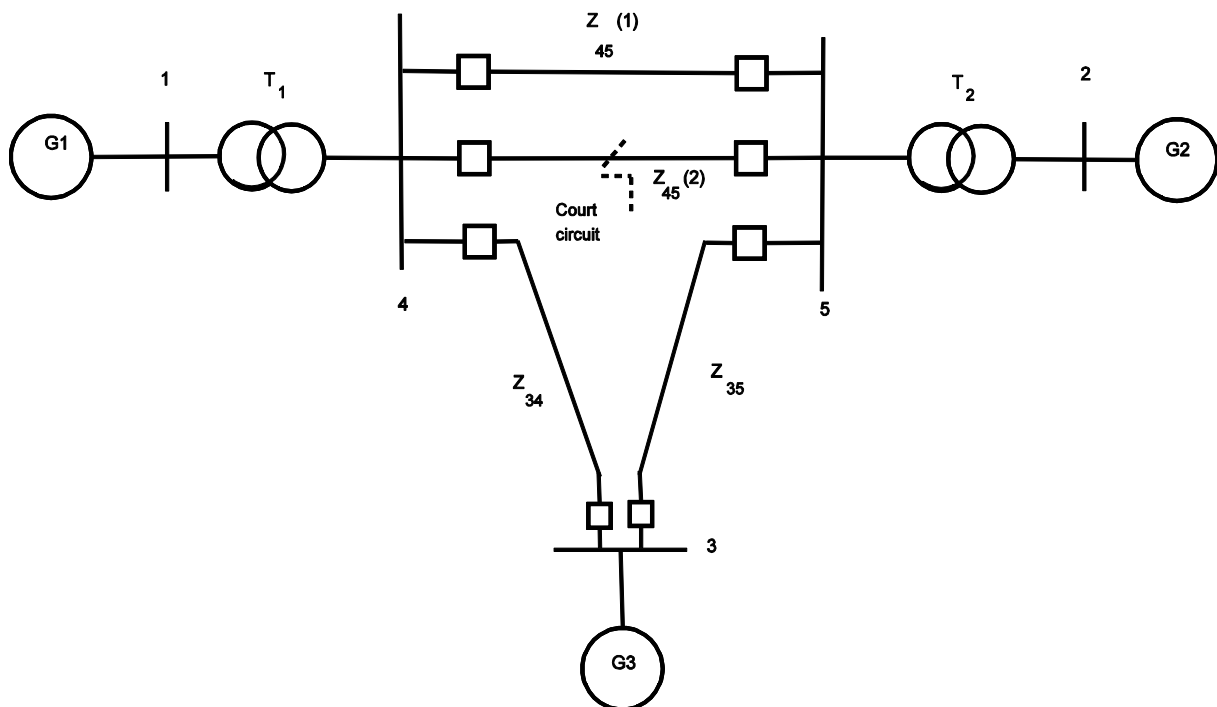
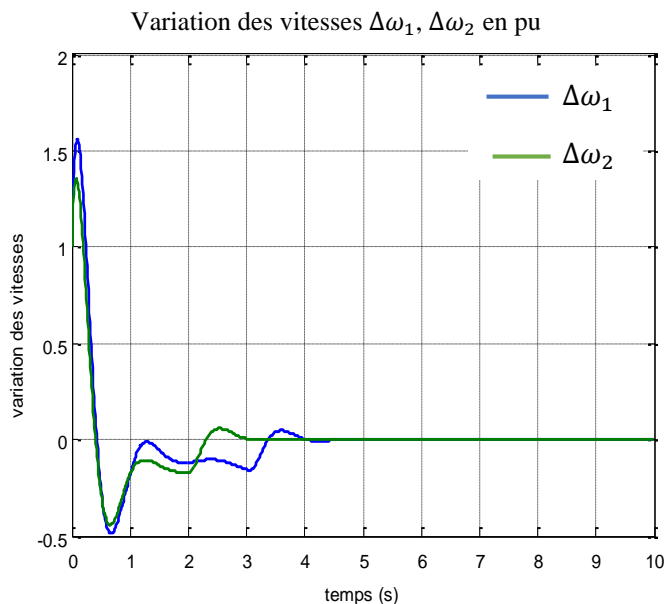
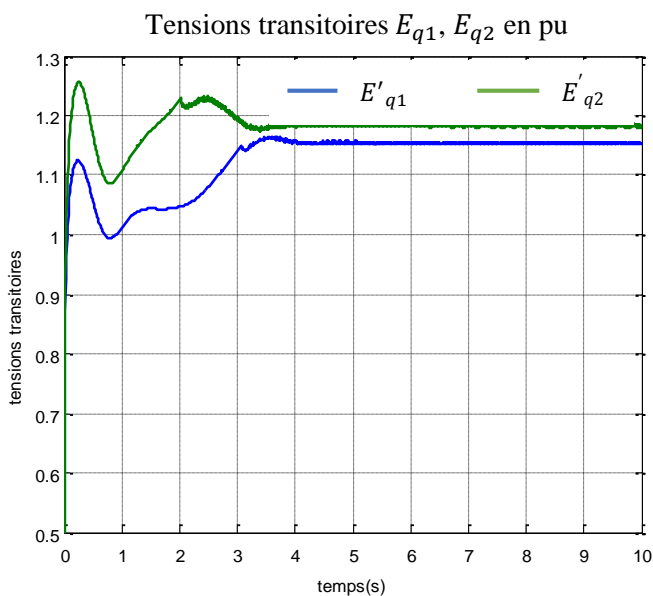
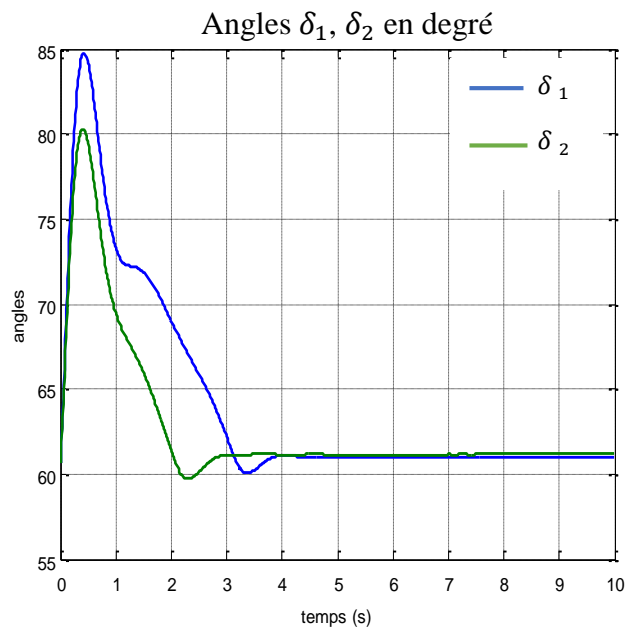
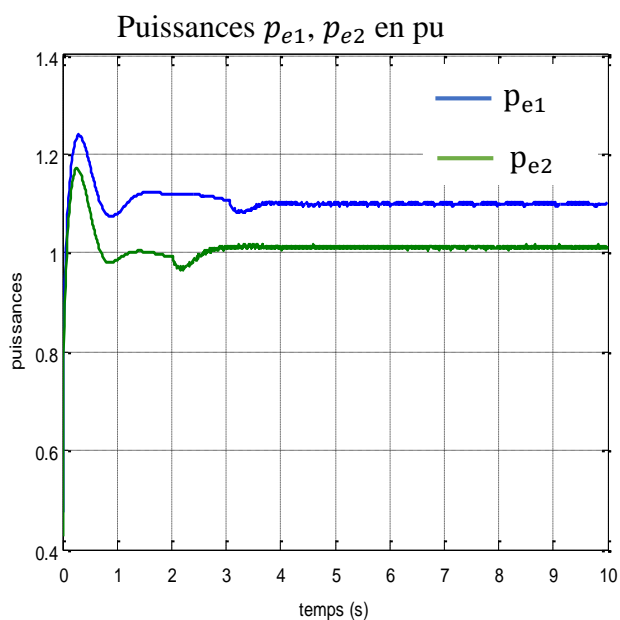


Figure 4.2 Réseau à trois générateurs.

4.7.1 Les résultats de simulation en présence d'un court-circuit

A l'instant $t=1s$, un court-circuit est appliqué. Les résultats de simulation sont montrés par les figures suivantes:



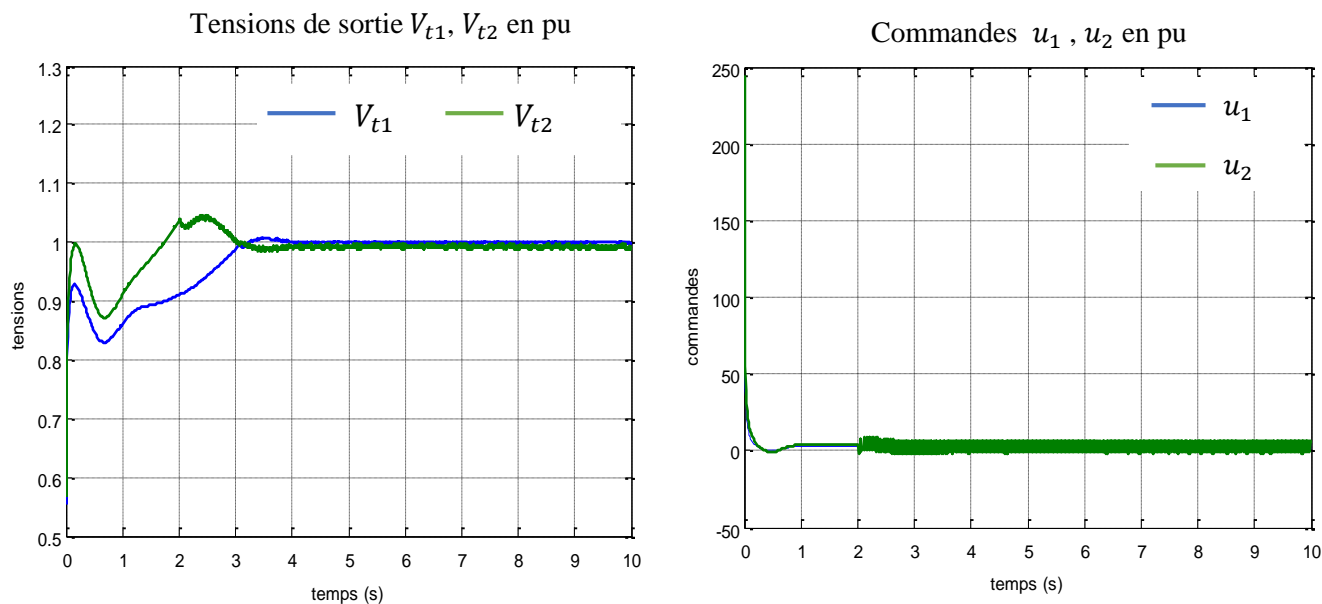


Figure 4.3 Résultat de simulation en présence de défaut.

4.7.2 Interprétation des résultats de simulation

Un test de robustesse vis-à-vis d'un court-circuit appliqué à l'instant $t=1s$ est considéré.

A travers les résultats de simulation obtenus, nous pouvons observer la robustesse des commandes par rapport au court-circuit.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire sur un réseau électrique. L'objectif de cette loi est de maintenir les grandeurs du réseau (l'angle, la vitesse, la tension de la sortie et la puissance électrique) de chaque générateur à une valeur désirée.

Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de cette technique sur ce modèle non linéaire. Nous avons considéré le cas d'une simulation sans défaut puis avec défaut (court-circuit).

A travers les résultats de simulations, nous avons pu constater des résultats appréciables concernant la régulation précise de la puissance électrique de chaque générateur, ainsi que la convergence de la tension de sortie.

Concernant le test de la robustesse (court-circuit), nous avons obtenu de bons résultats.

Afin d'éliminer le phénomène de 'Chattering', qui est dû à l'existence des fonctions *sign* dans la structure des commandes, nous avons remplacé la fonction *sign* par la fonction *tanh*.



Conclusion générale

Les réseaux électriques réalisent généralement trois tâches : la production, la transmission et la distribution. Dans la première tâche, l'énergie électrique est générée en utilisant dans la plus part du temps des générateurs synchrones.

Dans ce mémoire, nous avons élaboré une commande fractionnaire par mode glissant pour un réseau électrique multi-machines, afin de régler l'angle, la vitesse, la tension de sortie et la puissance électrique au niveau de chaque machine (générateur) du réseau électrique.

Le choix du réseau électrique est motivé par le fait qu'il représente un bon exemple de systèmes complexe fortement non linéaire. Pour cela, 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 générateurs.

Avant d'entamer l'application de la commande fractionnaire par mode glissant et dans le but de mieux comprendre les opérations fractionnaires avec des dérivées et des intégrales fractionnaires, nous avons présenté les notions de bases sur: l'attractivité des surfaces de glissement, la commande équivalente, les propriétés de robustesse ainsi que le phénomène de chattering.

Dans le dernier chapitre, nous avons appliqué la commande fractionnaire par mode glissant à un réseau électrique multi-machine. Les résultats de simulation ont montré les bonnes performances de cette technique.

Un test de robustesse vis-à-vis un défaut sous forme d'un court-circuit est appliqué. La commande a pu surmonter cette perturbation et assurer le maintien de la tension de sortie et de la puissance électrique aux valeurs désirées.

Pour éliminer le phénomène de chattering, nous avons utilisé la fonction \tanh au lieu de la fonction sign qui est discontinue. Les résultats de simulation montrent bien que cette méthode est efficace en éliminant le phénomène de chattering.

Ainsi, les résultats obtenus dans ce travail montrent l'efficacité de l'approche proposée vis-à-vis un court-circuit.

Enfin, on peut tirer les remarques suivantes:

Les avantages:

- Convergence en temps fini de la sortie vers la référence désirée.
- Meilleure précision de la convergence.
- Temps de réponse petit (régime transitoire).

Les inconvénients :

- Présence du phénomène de chattering sans l'introduction de la fonction tanh.

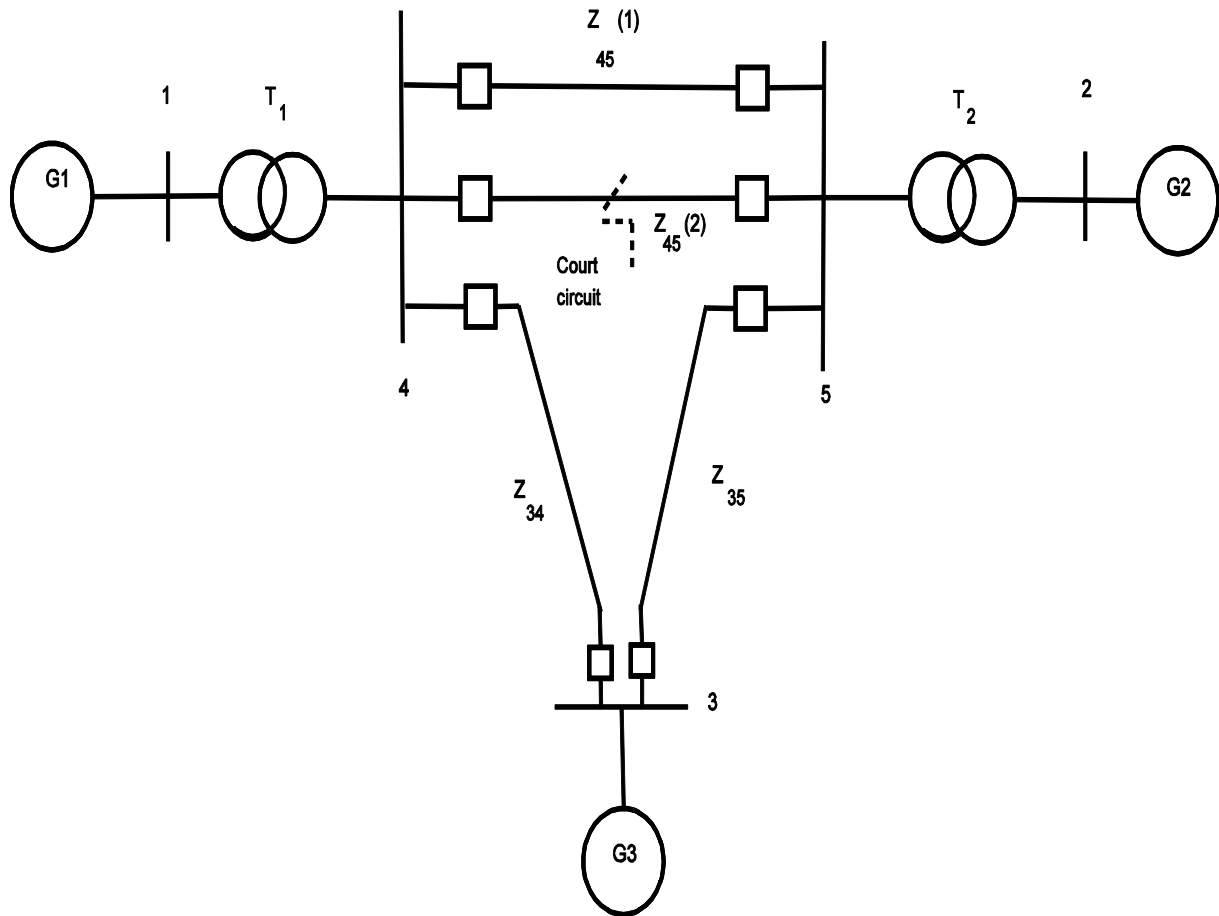
Notre travail peut se poursuivre par l'étude des points suivants:

- Modélisation du réseau électrique avec un modèle fractionnaire.
- Etude comparative entre la commande par mode glissant classique et fractionnaire.
- Application des autres commandes.
- Synthèse d'observateurs pour l'estimation des défauts et de la vitesse.



Annexes

Paramètres du réseau à trois générateurs



Paramètres des machines

| | x_d (pu) | x'_d (pu) | T_{do} (pu) | x_d (pu) | z_T (pu) | H (s) | D (pu) |
|--------------|------------|-------------|---------------|------------|------------|-------|--------|
| Générateur 1 | 1.863 | 0.257 | 6.9 | 1.712 | $0.129j$ | 4 | 5 |
| Générateur 2 | 2.36 | 0.319 | 7.96 | 1.712 | $0.11j$ | 5.1 | 3 |

Autres paramètres

| | |
|--------------------|---------|
| z_{34} (pu) | $0.53j$ |
| z_{35} (pu) | $0.6j$ |
| z_{45} (pu) | $0.55j$ |
| ω_0 (rad/s) | 314.159 |



Bibliographie

- [1]: Mario-Alberto Rios, Modélisation pour analyses dynamiques des réseaux électriques avec compensateurs de puissance réactive, Institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- [2]: Fonctionnement du réseau électrique; http://clients.rte.france.com/htm/fr/reseau/telecharge/etude_martigues/MD/MD_martigues_part1_.pdf.
- [3]: J. Sabatier, A. Oustaloup, A. G. Iturricha, P. Lanusse, Crone control: principles and extension to time-variant plants with asymptotically constant coefficients, *Nonlinear Dynamic*, 29(1–4):363–85, 2002.
- [4]: N. Djeghali, M. Bettayeb, S. Djennoune, J-P Barbot and M. Ghanes, Actuator and sensor faults estimation for fractional-order linear system via sliding mode observer, *ICMIC*, 2016.
- [5]: M. Caputo, Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent, *Vol.2*, n° 13, pp529-539, 1967.
- [6]: Khatir Khettab, Techniques avancées pour la synthèse et l'amélioration des performances des systèmes de commande adaptative d'ordre fractionnaire pour les processus incertains, Université de Skikda, 2016.
- [7]: Yassine Bensafia, Utilisation des filtres fractionnaires pour la conception de régulateurs adaptative, Université de Skikda, 2016.
- [8]: Yassine Boukal, Observation et commande des systèmes dynamiques d'ordre non entier, Thèse Doctorat, Université de Lorraine, 2017.
- [9]: Amar si Amour, Contribution de la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2011.
- [10]: S.G.Samko, A.A.Kilbas et O.I, Marichev fractional Integrals and Derivatives, Gordon and Beach Science publishers, 1993.
- [11]: N. Alanldin, Solutions of dynamic equations system science Collage Eng and Tech.Journal.Vol.29, N03, 2011.
- [12]: I. Podlubny, Fractional-order system and $p-i\lambda-d\mu$ -controllers, *IEEE Trans Autom Control* 44(1):208–14, 1999.
- [13]: A. Si-Ammour, S. Djennoune, M. Bettayeb, A sliding mode control for linear fractional systems with input and state delays, *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 14(5):2310–8, 2009.
- [14]: S. Dadras, H.R. Momeni, Fractional sliding mode observer design for a class of uncertain fractional order nonlinear systems, *Proceedings of the IEEE conference on decision and control and European control conference, CDC- ECC 2011, Orlando, December 12–15, 2011.*

- [15]: Åström K.J., Wittenmark. B, Adaptive control, NewYork: Addison-Wesley publishing company, 1995.
- [16]: Aurélien D, “Etude de systèmes différentiels fractionnaires,” Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2010.
- [17]: Axtell M., Bise M.E, Fractional calculus applications in control systems, the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, New York, USA, pp. 563-566, 1990.
- [18]: Åström K.J, “Adaptive Feedback Control”, Proceedings of The IEEE, Vol. 75, No. 2, pp. 185-217, February, 1987.
- [19]: Thierry Lubin, Modélisation et commande de la machine synchrone a reluctance variable prise en compte de la saturation magnétique, énergie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2003.
- [20]: Mario-Alberto Rios, Modélisation pour analyses dynamiques des réseaux électriques avec compensateurs de puissance réactive, énergie électrique, Institut national polytechnique de Grenoble, 1998.
- [21]: Philippe junior ossoucah, Analyse paramétrique des réseaux électrique sur matlab, Département de Génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 2010.
- [22]: Thèse doctorat; système photovoltaïques raccordés au réseau électrique destiné aux doctorants marocains des filières photovoltaïques, Université Mohammed V-rabat Ecole supérieur de technologie, 2015.
- [23]: Mémoire d'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques, Université Constantine 1 faculté des sciences de la Technologie département électronique, 2014.
- [24]: Miguel Angel Foutela, Garcia, Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée, Département de Génie électrique, Institut Polytechnique Grenoble 200

