

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali BOUNAAMA - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En

Electrotechnique

Option :

Electrotechnique industrielle

Titre :

Commande Adaptative Décentralisée d'un Réseau Electrique

Multi-machines

Réalisé par :

Boucherit Moussa Islam

Benzahra Ahmed

Encadré par :

Boualem Bendouha

Année universitaire :2017/2018

Remerciement

D'abord, nous remercierons Allah tout puissant qui nous a donné la force, et la patience de terminer ce travail.

A nos parentes pour qui nous ont portons les plus nobles sentiments et les plus profondes estime.

A tout nos enseignants qui nous ont mené a' ce qu'on est
Aujourd'hui

Nous remercierons toute personne ayant participé de près
Ou de loin a' la préparation de ce projet de fin d'étude

Aux membres de jury Dr A.S.Benyoucef, Dr Y.BOT qui ont bien voulu nous honorer, Assister, à notre soutenance et évaluer nos efforts.

A mon encadreur B.Bendouha

Enfin a' tous ceux qui lisent cette mémoire en croyant a'
Notre passion pour ELCTROTECHNIQUE.

MERCI du plus profond du cœur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de tous les êtres chers que j'ai perdus

À MON Père ;

À Ma Maman ;

Pour l'amour et l'affection qu'elle m'a donnés ;

Pour ses conseils fructueux ;

À Mes frères et sœurs ;

À Mes, cousins et cousines ;

Une dédicace spéciale à mon oncle ammar boulal

« khali ya khali w chhal nebghi khali »

Pour leurs soutiens ;

Pour leurs encouragements ;

Pour leurs aides

Mes chers amis et mes chers camarades étudiants...

À mon ami et celui avec qui j'ai partagé ce travail :

Ahmed, ainsi qu'à toute sa famille.

À Toute la PROMOTION 2018

MOUSSA ISLAM

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À Mes parents ;

À Mes frères;

À Mes sœurs;

À Mes, cousins et cousines;

Mes chers amis et mes chers camarades étudiants...

À mon ami et celui avec qui j'ai partagé ce travail:

Moussa Islam, ainsi qu'à toute sa famille.

À Toute la PROMOTION 2018

Ahmed

Résumé :

Dans ce travail, 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 fourni à une des machines constituant le réseau électrique et l'autre un court – circuit triphasé. pour commander des systèmes non linéaires de puissance multi-machines. en utilise la commande adaptative floue indirecte a Modèle de Reference, La dynamique des systèmes non linéaires est approximée par des systèmes flous. dont les paramètres sont ajustés par des lois d'adaptation. et d'un terme de commande robuste rajouté pour compenser les effets des erreurs d'approximations et des interconnexions entre les sous-systèmes. La loi de commande indirecte proposée est toujours bien définie et son implémentation ne nécessite pas la connaissance de la région admissible des paramètres estimés. La stabilité et la robustesse du système global bouclé sont prouvées analytiquement en utilisant une approche de type Lyapunov. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de la commande.

Mots clés : commande adaptative floue- Système de puissance multi-machines- Approche de lyapunov.

Abstract :

In this work, we chose two faults to test the stability of power grids; the first is a sharp increase in the value of the mechanical power supplied to one of the machines constituting the electrical network and the other a three-phase short circuit. to control non-linear multi-machine power systems. proposes an indirect fuzzy adaptive control strategy to Reference Model. The dynamics of nonlinear systems is approximated by fuzzy systems. whose parameters are adjusted by adaptation laws. and a robust control term added to compensate for the effects of approximation errors and interconnections between subsystems. The proposed indirect control law is always well defined and its implementation does not require knowledge of the admissible region of the estimated parameters. The stability and robustness of the overall looped system are proven analytically using a Lyapunov type approach. The simulation results obtained show the efficiency of the control.

Keywords: Fuzzy Adaptive Control- Multi-Machine Power System- Lyapunov Approach.

ملخص:

في هذه المذكرة، لدراسة استقرار شبكة توزيع الكهرباء اثناء وقوع عطلين: الأول ارتفاع كبير في قيمة القوة الميكانيكية المقدمة لإحدى الآلات المكونة للشبكة الكهربائية، والآخر وقوع دارة مستقصرة ثلاثية الأطوار، للتحكم في نظام الطاقة الكهربائي الغير خطي متعدد الآلات، نقتراح استراتيجية التحكم التكيفي الغامض الغير مباشر، ديناميكية الأنظمة الغير خطية مقربة بواسطة الأنظمة الغامضة، اين الاعدادات مصححة بقوانين تكيفية. ومن جهة أخرى النظام التحكمي الفعال يستعمل لغرض تحسين نتائج الأخطاء التقريبية ونتائج الربط بين الشبه أنظمة، دائماً ما يكون قانون المراقبة غير المباشر المقترح محدداً جيداً ولا يتطلب تنفيذه معرفة بالمنطقة المقبولة من المعلمات المقدرة. لفعالية واستقرار النظام الكلي ذو الحلقة المغلقة نستعمل نهج(ليابينوف) .نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تظهر كفاءة النظام .

الكلمات المفتاحية: نظام التحكم التكيفي الغامض، نظام طاقة متعدد الآلات ، نهج ليابينوف

LISTE DES SYMBOLES

A_m : est une matrice d'Hurwitz.

β : constante positive.

D : coefficient d'amortissement.

E : force électromotrice (f.e.m).

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

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

$e_d = \dot{\psi}_d$: la f. e. m de transformation.

e : l'erreur de poursuite

f_0 : la fréquence de base .

f et g : sont des fonctions continues.

\hat{f} et \hat{g} Estimées fonction f et g

H : constante d'inertie électrique.

I : courant circulant aux bornes de la machine.

I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q : Le courant

I_d : Composante du courant sur l'axe d.

I_q : Composante du courant sur l'axe q.

$I_{(n-1)}$: indiquer la matrice d'identité et un vecteur de zéros de dimension (n-1)

K : coefficient constant induit par la transformation de PARK.

k : vecteur de gain

$l_f h$: Operateur de lie de fonction h dans la direction de f .

L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q : Les inductances propres.

M_R, M_f, M_D, M_Q : Les inductances mutuelles.

P' : le nombre de dérivées nécessaires pour faire apparaitre l'entrée.

P : puissance active de la machine.

p_m : puissance mécanique.

p_e : puissance électrique .

R_s : la résistance d'une des phases.

\dot{T}_{d0} : La constante de temps transitoire d'axe d lorsque les enroulements du stator sont ouverts.

u : l'entrée de la commande.

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

V : tension aux bornes de la machine.

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

\bar{V} : Vecteur de la tension de sortie des coordonnées communes.

v : la sortie de système.

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

ω : la pulsation instantanée, vitesse instantanée.

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

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

X_d : Réactance sur l'axe d.

X_d : Réactance synchrone.

y_{ii} : La somme de toutes les admittances connectées au nœud i.

y_{ij} : L'opposé de l'admittance qui lie le nœud i et le nœud j.

\bar{Y} : Matrice des admittances du réseau.

$y(t)$: la sortie de système.

y_m : Signal de référence

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

δ : Angle interne.

ψ : Le flux .

$\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_D, \psi_Q$, le flux

$\lambda_{\max}(P)$: les Valeurs propres Maximales des Matrices P.

$\lambda_{\min}(Q)$: les Valeurs propres Minimales des Matrices Q.

Liste des figures

Figure(I.1) : Illustration du réseau électrique : de la production vers la consommation.....	6
Figure(I.2) : Types de phénomènes de stabilité des réseaux électriques.....	10
Figure(I.3) : déplacement du point de fonctionnement de l'alternateur suite à une augmentation de la puissance mécanique.....	13
Figure(I.4) : Un bus typique du système d'alimentation.....	15
Figure(II.1) : Machine synchrone connectée à un bus infini.....	18
Figure (II.2) : représentation du système d'alimentation d'analyse de stabilité transitoire.....	18
Figure (II.3) : Représentation picturale d'une machine synchrone.....	19
Figure(II.4) : enroulements de la machine synchrone.....	20
Figure(II.5) : Repère D-Q de la transformation Vectorielle.....	27
Figure (II.6) : Topologie du réseau électrique à une machine a bus infini.....	30
Figure(II.7) : Réponse du système à une machine avec court-circuit sans réglage.....	30
Figure(II.8) : Réponse du système à une machine avec une augmentation de 20% de la puissance mécanique sans réglage.....	31
Figure (III.1) : Commande Adaptative indirecte.....	34
Figure (III.2) : Commande adaptative directe.....	34
Figure (III.3) : schéma de commande adaptative à modèle de référence.....	35
Figure (IV.1) : Représentation des systèmes flous.....	45
Figure (IV.2) : Opérateur ET.....	46
Figure (IV.3) : Opérateur OU.....	46
Figure (IV.4) : Exemple d'inférence Max-Min.....	50
Figure (IV.5) : Exemple d'inférence Max-Produit.....	51
Figure (IV.6) : Approximation des Fonction par un Système Flou.....	52
Figure (IV.7) : Schéma général d'un stabilisateur indirect adaptatif flou.....	53
Figure (IV.8) Réseau Electrique à une machine avec accroissement brutal de 20% de la puissance mécanique après l'application de la commande.....	54
Figure (IV.9) Réponse du système à une machine avec court-circuit triphasé après l'application de la commande.....	54

Liste des tableaux

Tableau(IV.1) : Matrice d'inférence	48
---	----

Sommaire

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

Chapitre-I : GÉNÉRALITES SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.1. Introduction	4
I.2. Structure des réseaux électriques.....	5
I.2.1. Unités de Génération.....	5
I.2.2. Transport.....	5
I.2.3. Répartition.....	5
I.2.4. la distribution.....	6
I.3. Stabilité des réseaux électriques.....	6
I.3.1. Classification de la stabilité de réseau électrique.....	7
I.3.1.1. La stabilité angulaire.....	7
I.3.1.1.1 Stabilité Transitoire.....	8
I.3.1.1.2. Stabilité Dynamique.....	8
I.3.1.1.3. Stabilité Statique.....	8
I.3.2. Stabilité en fréquence.....	9
I.3.3. Stabilité en tension.....	9
I.4. Comportement d'un réseau électrique industriel.....	10
I.4.1. Les charges passives.....	11
I.4.2. Les transformateurs et les liaisons.....	11
I.4.3. Les machines asynchrones.....	11
I.4.4. Les machines synchrones.....	11
I.4.4.1. Stabilité dynamique des machines synchrones couplées à un réseau de puissance infinie.....	13
I.5. Ecoulement de puissance.....	14
I.5.1. Slack Bus.....	14
I.5.2 Charge Bus (load bus).....	14
I.5.3 Bus régulés (Regulated Buses).....	14
I.5.2. Solution d'équation Algébrique non linéaire.....	14
I.5.2.1.Équation de L'écoulement de Puissance.....	15

I.5.2.2. Solution de L'écoulement de Puissance (Gauss Seidel).....	16
--	----

Chapitre-II : MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

II.1. Introduction.....	17
II.2. Synchronisation des alternateurs.....	17
II.2.1. Alternateur branché sur un réseau infini.....	17
II.2.2. Réseaux Electriques Multi-machines	18
II.3. Modélisation de la machine synchrone.....	19
II.3.1. Partie électrique	19
II.3.2. Partie Mécanique	22
II.3.3. Transformée de PARK	23
II.4. Modèle électrique.....	26
II.5.Lignes de transmission.....	27
II.6. Modèle non linéaire d'un réseau de puissance infinie	29
II.7.Simulation	30
II.8. Conclusion	32

Chapitre-III : Aperçu Sur La Commande Adaptative

III. Introduction	33
III.1. Représentation d'état des systèmes	33
III.2. Différentes topologie de la commande adaptative	33
III.2.1. Commande adaptative indirecte.....	33
III.2.2. commande adaptative directe	34
III.2.3. commande adaptative à modèle de référence	34
III.2.3.1. Méthode basée sur la stabilité de Lyapunov	36
III.3. commande adaptative : classe de système non linéaire	37
III.3.1. la transformation des systèmes non- linéaires	37

III.3.1.1. Position de problèmes	37
III.3.1.2. Représentation entrée-sortie.....	38
III.4. La commande linéarisant	42
III.5 Analyse de stabilité	44
III.6 conclusion	44

Chapitre-IV : COMMANDE ADAPTATIVE FLOUE INDIRECT

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Opérateurs utilisés dans la logique floue.....	45
IV.2.1.Opérateur ET.....	45
IV.2.2.Opérateur OU.....	46
IV.2.3. Règles linguistiques	46
IV.2.4. Conception d'un contrôleur flou	47
IV.3.1. Fuzzification.....	47
IV.3.2. Base de règles d'un système flou.....	47
IV.3.2.1. Inférence floue.....	49
IV.3.2.1.1.Méthode d'inférence Max-Min.....	50
IV.3.2.1.2.Méthode d'inférence Max-Produit.....	50
IV.3.2.1.3.Méthode d'inférence Somme-Produit.....	50
IV.3.3. Défuzzification.....	51
IV.4.Simulation... ..	54
IV.5.Conclusion... ..	55
Conclusion générale.....	56

Annexe

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Introduction

Générale

I. Introduction Générale

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.

En effet, le réseau électrique doit être capable de maintenir la stabilité, suite à plusieurs types de perturbations, allant d'une simple perturbation (flicker, surcharge) à un défaut plus grave (court-circuit).

Suite à une perturbation transitoire, si le système est stable, il atteindra un nouvel état d'équilibre. Si le système est instable, cela se traduira par une augmentation graduelle de l'écart entre les angles de rotor des générateurs ou par une diminution progressive des tensions des noeuds du réseau [1], la conséquence de ces défauts pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau électrique.

Pour transcender à ces problèmes différents approches classiques de commande ont été largement appliquées dans plusieurs problèmes de régulation industrielle. Cependant, la plupart des systèmes physiques présentent des non linéarités et leurs paramètres sont souvent mal connus et/ou variables dans le temps. Pour la commande de telles classes de systèmes les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances [2].

Avec le développement des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser aux nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que les techniques basées sur l'intelligence artificielle.

Parmi ces dernières ; la commande par logique floue. Cette commande est utilisée depuis des années dans la commande des systèmes de puissance. Plusieurs implantations pratiques ont

Introduction général

montré que les performances sont améliorées en comparaison aux correcteurs conventionnels. Les incertitudes sur les mesures de certains paramètres et l'approximation du modèle de la machine justifient l'utilisation des correcteurs flous. La perspective d'employer la logique floue et donc d'obtenir des résultats supérieurs aux commandes classiques.

En ce qui concerne la commande adaptative floue, l'idée est d'avoir un signal de commande additionnel qui agit sur le correcteur flou. Ce signal est activé lorsque la dynamique de système viole certaines conditions. Notons qu'il existe plusieurs techniques conventionnelles de commande adaptative (commande par modèle de référence, commande auto réglable, commande à structure variable,...) ces techniques ont eu, cependant, des applications industrielles limitées, à cause surtout de la complexité de l'implantation et du calcul des coefficients de réglage. Actuellement, dans les applications de hautes performances, les correcteurs flous constituent une alternative attractive très importante.

Les actionneurs de hautes performances dynamiques sont utilisés surtout en robotique et dans les systèmes où on doit maintenir une vitesse ou position fixe dans une très large plage de variations des conditions d'opération.

Du point de vue de la topologie de commande, nous proposons une correction du signal généré par le correcteur flou de la chaîne principale par un mécanisme d'adaptation flou qui prend des décisions basées sur un modèle de référence

L'algorithme conçu sera analysé par simulation sous environnement Matlab.

L'objectif de ce travail est d'utiliser une méthode de conception d'un stabilisateur intelligent réside d'une commande non linéaire robuste qui fusionnant la commande adaptative, la logique floue pour le réseau électrique. Les caractères non linéaire et robuste assurent que le régulateur préserve la stabilité en amortissant les oscillations indépendamment du point d'opération et ce en présence des variations paramétriques du système.

Notre travail se base sur les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre nous présentera 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 s'associées aux équations algébriques des

Introduction général

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

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes topologies du contrôle adaptative et comment transformer un système non linéaire en un système linéaire au moyen de la boucle Linéarisant qui est basée sur la dérivée et le crochet Lie avant l'application de la commande adaptative floue dans notre système.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons la commande Adaptation floue et son type, en plus de l'application de la commande dans notre système. une approche combinant la commande adaptative et la commande floue, est utilisée pour prendre en charge des systèmes non linéaires incertains. En effet les descriptions linguistiques décrivant le fonctionnement du système sont incorporées dans le contrôleur. Les paramètres de ce dernier sont ajustés par des lois d'adaptation appropriées. Pour garantir la stabilité des systèmes en boucle fermée, dans le sens que tous les signaux impliqués sont uniformément bornés, la conception du contrôleur est faite selon la synthèse de Lyapunov.

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Chapitre

I

I.1. Introduction :

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus populaire, car elle peut être transportée facilement à un rendement élevé et à un coût raisonnable.

Le premier réseau électrique aux États-Unis a été créé en 1882 à la gare pearl street de New York par thomas Edison. L'énergie a été générée par des générateurs à courant continu et distribuée par des câbles souterrains. La même année, le premier générateur à roue hydraulique a été installé à Appleton, dans le Wisconsin. En quelques années, de nombreuses entreprises ont été établies produisant de l'énergie d'éclairage - toutes exploitées sous les brevets d'Edison. En raison de la perte de puissance excessive, RI^2 à basse tension, les entreprises d'Edison pourraient livrer de l'énergie à une courte distance de leurs stations.

avec l'invention du transformateur (William Stanley, 1885) pour élever le niveau de tension alternative pour la transmission et la distribution et l'invention du moteur à induction (Nikola Tesla, 1888) pour remplacer les moteurs cc, l'avantage du système ac devient apparent , et fait le système de courant alternatif répandu. Un autre avantage du système à courant alternatif est qu'en raison du manque de commutateurs dans ces générateurs ac, plus de puissance peut être produite commodément à des tensions plus élevées. [3]

Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

La production de l'énergie électrique résulte de diverses transformations. Par exemple, la production de l'énergie électrique d'origine mécanique est basée principalement sur la transformation de l'énergie primaire sous forme potentielle pour les turbines hydrauliques et calorifique pour les turbines à vapeur en une énergie électrique.

La transformation de l'énergie primaire en énergie électrique comporte trois sous transformations fondamentales qui sont la transformation du combustible dans la chaudière en énergie calorifique, la transformation de l'énergie calorifique en énergie cinétique via la turbine et la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique dans l'alternateur. L'énergie obtenue à la sortie de l'alternateur aux pertes près est transmise aux consommateurs. Selon la demande d'énergie, la production est contrôlé moyennant le réglage de l'énergie primaire et ce en actionnant les vannes d'admission principales de la turbine.

I.2. Structure des réseaux électriques :

I.2.1. Unités de Génération

Une composante essentielle des systèmes de puissance, qui utilise normalement des machines à courant Alternatif Triphasé, connu en tant que générateurs ou Alternateurs Synchrones, et qui Transforme la puissance mécanique à une puissance Electrique. Les générateurs ont deux champs rotation synchrone, un champ produit par le rotor est entraîné à la vitesse synchrone et excité par un courant continu. L'autre champ est produit dans les enroulements de stator par les courants d'armature triphasé. La source de la puissance mécanique connu comme le premier moteur, peut être turbine hydrauliques, turbine à vapeur dont l'énergie provient de la combustion du charbon, du gaz et du combustible nucléaire, les turbines à gaz ou moteurs à combustion interne. Dans les centrales électriques, plusieurs générateurs sont connectés en parallèle pour fournir la puissance totale nécessaire. [10]

I.2.2. Transport

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV)pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV.[11]

I.2.3. Répartition

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des poste d'interconnexion THT/HT(MT) et sert fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des typiques 60 et 30 kV.[11]

I.2.4. la distribution :

Contrairement aux réseaux de transport et répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 1 à 50 kV).
- les réseaux basse tension (BT de 50 à 1 000V).

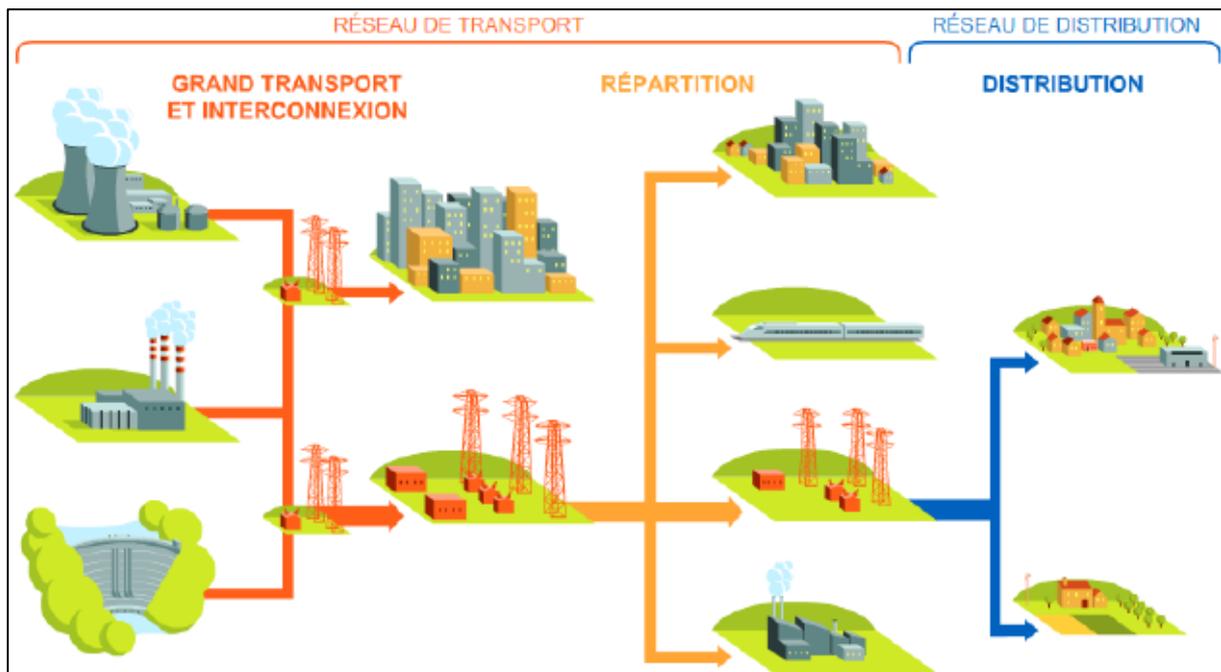


Figure I.1 - Illustration du réseau électrique : de la production vers la consommation

I.3. Stabilité des réseaux électriques :

La stabilité du réseau électrique est la capacité du système, étant donné un point de fonctionnement initial, à continuer à fonctionner après avoir été soumis à une perturbation, en gardant les variables du système dans les limites de fonctionnement admissibles. En général, le réseau est caractérisé par les fluctuations temporelles des variables électriques, et la stabilité globale du réseau électrique se manifeste par l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie électrique. Le comportement du réseau et sa stabilité face aux perturbations dépendent du lieu, de la nature et de l'ampleur des événements.

Les perturbations typiques du réseau sont dues à des défaillances ou aux changements de la structure du réseau, des conditions d'exploitation, systèmes de contrôle-commande des

machines ou du niveau des charges. Ces évènements peuvent aboutir à déstabiliser une partie ou l'ensemble du réseau.

La stabilité peut être sub-divisée, selon l'effet de la perturbation, sur les variables électriques du réseau, principalement sur les machines. La stabilité est donc sub-divisée en trois catégories : la stabilité angulaire, qui étudie les excursions angulaires des rotors des machines synchrones, la stabilité de tension et la stabilité de fréquence du réseau. La stabilité peut être classée aussi selon la durée du phénomène, donc divisée en stabilité statique, transitoire et dynamique. La figure (I.2) Montre la classification de la stabilité selon l'effet sur les variables électriques. [5]

I.3.1. Classification de la stabilité de réseau électrique

A) la stabilité de l'angle de puissance

- la stabilité statique
- la stabilité dynamique
- la stabilité transitoire

B) la stabilité de la tension

C) la stabilité à moyen terme, court terme, long terme

On appelle stabilité transitoire le pouvoir de maintien du synchronisme des machines d'un réseau électrique en dépit de grandes perturbations. Ce type de stabilité dépend des conditions initiales, de la structure du réseau et de la sévérité des perturbations.

Si une grande perturbation agit sur le réseau électrique, ce dernier alors va considérablement s'éloigner de son point de fonctionnement et présenter un comportement non linéaire et complexe. Si la sévérité et la durée de la perturbation sont suffisamment petites, après l'état transitoire et après l'amortissement des oscillations, le réseau va s'établir à un nouveau point d'équilibre stable. Mais si la perturbation est assez grande, le comportement du réseau va diverger et perdre sa stabilité. L'augmentation des interconnexions dans les réseaux, de la rapidité des réponses dynamiques et de l'exploitation des lignes au plus proche de leurs limites de stabilité transitoire, accentue les effets indésirables des perturbations sur les réseaux électriques.[9]

I.3.1.1. La stabilité angulaire :

Est définie comme la capacité du réseau à maintenir le synchronisme entre les machines interconnectées et de retrouver un point de fonctionnement d'équilibre lorsque le réseau est soumis à des perturbations importantes. Les grandes perturbations peuvent conduire à de larges excursions des angles du rotor de machines et, lorsque les actions correctives échouent, à la

perte de synchronisme en fraction de millisecondes. Il faut maintenir l'équilibre entre le couple électromagnétique et le couple mécanique de la machine synchrone pour que le système soit stable. Ainsi la cause principale de l'instabilité angulaire est donc un déséquilibre entre les forces électromagnétiques et mécaniques appliquées à la machine. La stabilité angulaire peut être décomposée en deux types correspondant soit à la stabilité transitoire, soit à la stabilité dynamique (de petits signaux) [5].

I.3.1.1.1 Stabilité Transitoire :

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur, etc. La réponse du système comporte de grandes variations des angles rotoriques et est influencée par la relation non linéaire entre couples et angles.

I.3.1.1.2. Stabilité Dynamique :

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause de changements dans la structure du réseau, les conditions d'exploitation, les systèmes d'excitation, les charges. Ces oscillations peuvent augmenter et finalement venir déstabiliser une machine, une partie du réseau ou tout le réseau.

Dans ce cas, on peut utiliser des modèles linéaires. Les principaux éléments c'est à dire aux dynamiques ne sont pas négligeables sont la machine synchrone, le système d'excitation, le système de régulation de vitesse.

I.3.1.1.3. Stabilité Statique :

Après le régime transitoire dû à la perturbation, le système entre dans le régime permanent. Dans ce cas, pour étudier le système, il faut évaluer la stabilité statique du réseau. Le système n'est pas stable si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : l'état instable ou l'état d'urgence. Dans un réseau qui est dans l'état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement. Dans cette situation, on peut ramener tout le réseau à l'état normal grâce à des opérations de restauration.[12]

I.3.2. Stabilité en fréquence :

C'est la capacité du système à maintenir l'équilibre entre la production et la demande, afin de maintenir la fréquence proche de la fréquence nominale du réseau à 50 ou 60 Hz. L'instabilité peut être due à des oscillations de fréquence non amorties pouvant entraîner la déconnection des centrales et/ou des charges. Les petits réseaux îliens supportent souvent mieux les variations de fréquence, tandis que dans les grands réseaux interconnectés, les grandes perturbations peuvent conduire à des incidents généralisés (blackouts en Anglais).

La stabilité de fréquence court terme est associée à la déconnection d'une centrale ou aux changements intempestifs de la demande, (par exemple l'utilisation de fours à arc électrique peut causer des déséquilibres ou des instabilités provoquant la déconnection des éléments du réseau).

En revanche, la stabilité de fréquence longue terme a comme origine principale la mauvaise coordination des protections, la perte de synchronisme des générateurs, des tensions basses, l'insuffisance des réserves de puissance active (pour réaliser le réglage secondaire en fréquence) et l'incapacité à rétablir l'équilibre de puissance. [5]

I.3.3. Stabilité en tension :

C'est la capacité du système à maintenir la tension dans la plage de valeurs de tension règlementaire admissible. L'instabilité en tension se produit lorsqu'il y a une diminution ou une augmentation incontrôlée de la tension sur les nœuds d'une zone du réseau. Le facteur principal responsable de l'instabilité de tension est principalement le déséquilibre de puissance réactive dans le système.

Les petites perturbations qui peuvent provoquer une instabilité de tension sont l'augmentation de la demande, la déconnection de lignes, ou des défauts éloignés qui provoquent l'augmentation de la consommation de puissance réactive ou l'augmentation des pertes. La stabilité en tension aux grandes perturbations est occasionnée par des événements comme un court-circuit à proximité des centres de production, la déconnection des machines, les réactions des régulateurs en charge des transformateurs ou des contrôleurs de tension.

La stabilité en tension diffère également selon la période d'étude, il peut y avoir une instabilité à court terme et à long terme. L'instabilité à court terme implique le comportement transitoire des machines asynchrones, des dispositifs d'électronique de puissance et leur réponse dynamique devant un événement. Alors que l'instabilité à long terme est due aux limites de tension des transformateurs avec changeurs de prises, aux limiteurs de courant d'excitation

des générateurs, ou à l'absence de réserves de puissance réactive dynamiques dans le système.

[5]

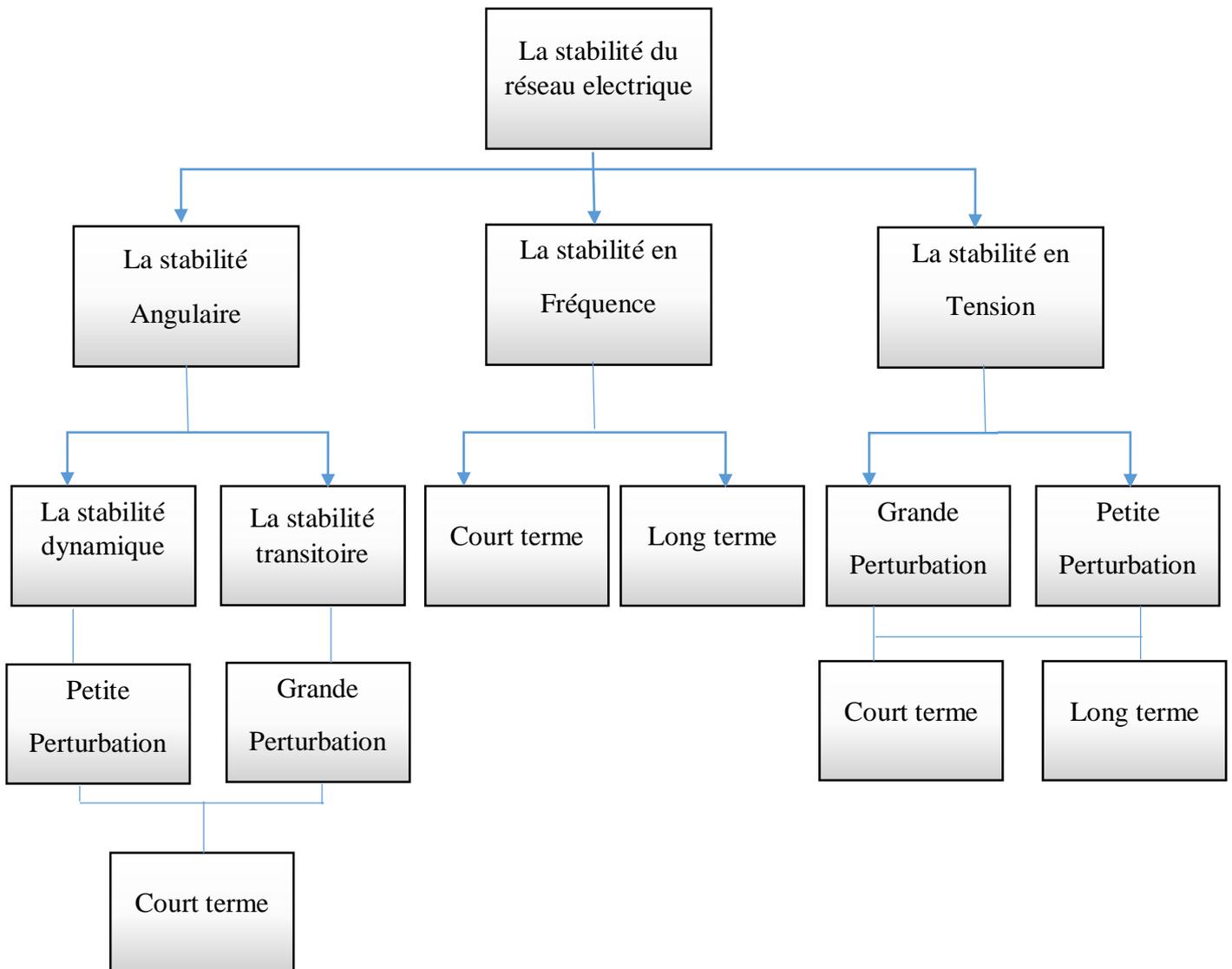


Figure I.2 : Types de phénomènes de stabilité des réseaux électriques.

I.4. Comportement d'un réseau électrique industriel :

Le comportement d'un réseau électrique lors de phénomènes transitoires dépend du comportement de chacun de ses éléments. Ceux-ci, partant d'un état stable, vont influencer sur le comportement transitoire de l'ensemble. Ils vont se trouver, en fin de perturbation, soit dans le même état stable qu'avant la perturbation, soit dans un autre état stable, soit dans un état instable, ce qui en général entraîne la perte d'un ou plusieurs éléments par l'activation des

protections. Il importe donc de connaître le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer le comportement de l'ensemble du réseau électrique. [6]

I.4.1. Les charges passives :

$$P = \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 \cdot P_n \quad (\text{Chauffage, éclairage...}) \quad \text{Eq (I.1)}$$

$$Q = \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 \cdot Q_n \quad (\text{Condensateurs}) \quad \text{Eq (I.2)}$$

I.4.2. Les transformateurs et les liaisons

Les transformateurs et les câbles qui assurent le transit de l'énergie électrique entre les sources et les charges, sont caractérisés par leurs impédances. Celles-ci créent des chutes de tension et des pertes Joule qui dépendent du courant qui les traverse.

Les valeurs de ces impédances sont déterminantes en régime transitoire :

- les forts courants d'appel provoquent des baisses de tension qui peuvent être critiques
- des réactances importantes entre les sources peuvent induire des oscillations de grande durée.

I.4.3. Les machines asynchrones :

En raison de leur comportement et de leur présence majoritaire dans les réseaux industriels (jusqu'à 80 % de la puissance consommée dans certaines installations), les moteurs asynchrones ont un rôle prépondérant dans les phénomènes de stabilité. [6]

La stabilité du moteur dépend des positions relatives des courbes de couple moteur et de couple résistant. Si le moteur subit une coupure ou un fort creux de tension pendant quelques instants, il va ralentir et se retrouver à une vitesse réduite, par exemple 60% de la vitesse de synchronisme. La réduction de la vitesse est d'autant plus importante que l'inertie est faible. Pourra-t-il ré-accélérer et retrouver son état stable d'origine ? Cela dépend de la valeur de la tension à son rétablissement.

I.4.4. Les machines synchrones

La machine synchrone est un convertisseur réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice soit en moteur. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, la machine synchrone prend le nom d'alternateur.

Organisation simplifiée de l'alternateur L'alternateur comprend deux parties principales:

L'inducteur : constitué d'électroaimants parcourus par un courant continu, ou parfois simplement constitué d'aimants permanents (porté par le rotor).

L'induit : constitué d'enroulements monophasés ou triphasés (porté par le stator)

Inducteur (porté par le rotor) :

Il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation.

L'inducteur comporte $2p$ pôles (p : paires de pôles).

Il existe 2 types d'inducteur :

-Rotor à pôles lisse :

Très robuste, il permet d'obtenir des fréquences de rotation élevées (>3000 tr/min).

Il est utilisé dans les centrales thermiques et les centrales nucléaires.

-Rotor à pôles saillants :

Tournant moins vite, et de ce fait fournissant moins de puissance, il est utilisé dans les centrales hydrauliques et les groupes électrogènes.

Induit (porté par le stator) :

Constitué de trois groupes de conducteurs logés dans ces encoches formant trois circuits (un pour chaque phase) décalés les uns des autres d'un angle convenable (120°) et fournissant de ce fait des courants triphasés.

Elles jouent un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux.

Rappelons les équations principales qui régissent leur fonctionnement :

$$E = V + X_d I \quad \text{Eq (I.4)}$$

$$P = \frac{3EV}{X_d} + \sin \delta \quad \text{Eq (I.5)}$$

E : force électromotrice (f.e.m.) interne ; sa valeur varie proportionnellement au courant continu qui traverse le rotor (hors saturation)

V : tension aux bornes de la machine

X_d : Réactance synchrone

I : courant circulant aux bornes de la machine

P : puissance active de la machine

δ : angle interne égal à l'angle de phase de E par rapport à V ou angle mécanique entre l'axe du rotor E et la référence synchrone constituée par la tension V aux bornes de la machine.

Et rappelons la règle fondamentale de la stabilité statique d'un alternateur, c'est-à-dire son aptitude à répondre à une variation lente de la charge : le fonctionnement n'est stable que si l'angle interne δ reste inférieur à 90° .

I.4.4.1. Stabilité dynamique des machines synchrones couplées à un réseau de puissance infinie :

Les problèmes de stabilité dynamique résultent du passage de la machine d'un état stable à un autre. Considérons le cas d'une machine couplée au réseau de distribution publique qui subit un à-coup de puissance mécanique fournie par la turbine, celle-ci passe brusquement d'une puissance fournie P_1 à une puissance fournie P_2 (voir fig. I.3).

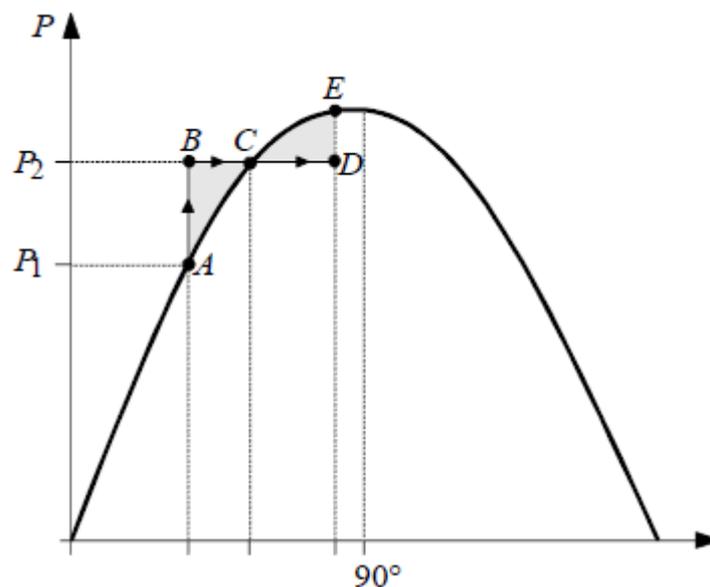


Figure I.3 : déplacement du point de fonctionnement de l'alternateur suite à une augmentation de la puissance mécanique. [7]

En conséquence, l'angle interne maximal δ_{\max} peut être supérieur à 90° de façon transitoire. La limite de stabilité dynamique est donc plus élevée que la limite de stabilité statique.

I.5. Ecoulement de puissance

Les études de l'écoulement de puissance, constituent une partie importante de l'analyse du système électrique. Elles sont nécessaires à la planification (la planification économique et au contrôle d'un système existant). Le problème consiste à déterminer les grandeurs et l'angle de phase de la tension à chaque bus et le flux de puissance active et réactive dans chaque ligne.

Pour résoudre un problème de l'écoulement de puissance, le système est supposé fonctionner dans un état déséquilibré et un modèle monophasé est utilisé. Quatre quantités sont associées à chaque bus. Ce sont la grandeur de tension $|V|$, l'angle de phase δ , la puissance active P , et la puissance réactive Q . Les bus système sont généralement classés en trois types.

I.5.1. Slack Bus :

(**slack** or **swing bus**), est pris comme référence où la grandeur et l'angle de phase de la tension sont spécifiés. Le bus constitue la différence entre les charges planifiées et la puissance générée qui sont causées par les pertes dans le réseau.

I.5.2 Charge Bus (load bus) :

Les puissances active et réactive sont spécifiées. L'amplitude et l'angle de phase des tensions de bus sont inconnus. Ces bus sont appelés bus **P-Q**.

I.5.3 Bus régulés (Regulated Buses):

Ce sont les bus du générateur. Ils sont également connus sous le nom de (bus à tension contrôlée). À ces bus, la puissance active et l'amplitude de la tension sont spécifiées. Les angles de phase de la tension et de la puissance réactive doivent être déterminés. Les limites sur la valeur de la puissance réactive sont également spécifiées. Ces bus sont appelés bus **P-V**

I.5.2. Solution d'équation Algébrique non linéaire :

Les techniques les plus couramment utilisées pour la solution itérative des équations algébriques non linéaires Gauss-Seidel, Newton-Raphson et Quasi-Newton. Les méthodes de

Gauss-Seidel et de Newton-Raphson sont discutées pour l'équation unidimensionnelle, puis étendues aux équations à n dimensions.

I.5.2.1.Équation de L'écoulement de Puissance :

Considérons un bus typique d'un réseau électrique comme indiqué dans (figure.4) les lignes de transmission sont représentées par leurs modèles π équivalents où les impédances ont été converties en admittance par unité sur une base MVA commun.

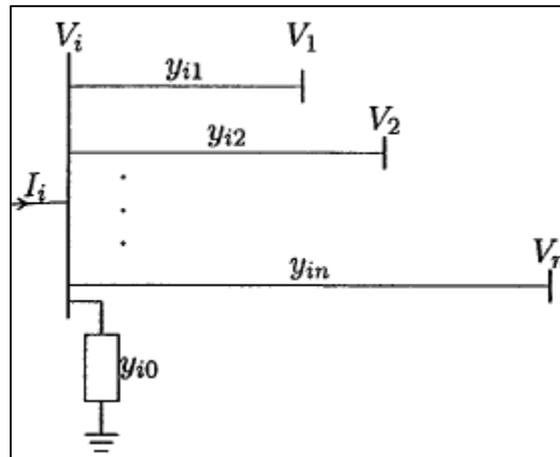


Figure I.4 : Un bus typique du système d'alimentation [3]

$$\begin{aligned}
 I_i &= y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n) \\
 &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) V_i - y_{i1} V_1 - y_{i2} V_2 - \dots - y_{in} V_n
 \end{aligned}
 \tag{I.6}$$

Ou

$$I_i = \sum_{j=0}^n y_{ij} \cdot V_j - \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad j \neq i
 \tag{I.7}$$

La Puissance Active et Réactive de bus (i) :

$$P_i + jQ_i = 3V_i I_i^*
 \tag{I.8}$$

Ou

$$I_i = \frac{P_i + jQ_i}{3V_i^*}
 \tag{I.9}$$

$$\frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \cdot V_i - \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad j \neq i \quad \text{Eq (I.10)}$$

De la relation ci-dessus, la formulation mathématique du problème de l'écoulement de puissance se traduit par un système d'équations non linéaires algébriques qui doivent être résolus par des techniques itératives.

I.5.2.2. Solution de L'écoulement de Puissance (Gauss Seidel) :

Dans l'étude du flux de puissance, il est nécessaire de résoudre l'ensemble des équations non linéaires représentées par (Eq 10) pour deux variables inconnues à chaque nœud. Dans la méthode de Gauss-Seidel (Eq 10) est résolu pour V_i , et la séquence itérative devient :

$$S_i = P_i + jQ_i \quad \text{Eq(I.11)}$$

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}} \quad j \neq i$$

y_{ij} admittance en pu (per unit).

p_i^{sch} La Puissance Active en pu (per unit).

Q_i^{sch} La Puissance Réactive en pu (per unit).

Expressions de la Puissance Active et Reactive :

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad \text{Eq (I.13)}$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad \text{Eq (I.14)}$$

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Chapitre

II

II.1. Introduction

Le réseau électrique peut être modélisé comme un générateur alimentant une barre (nœud) de puissance infinie ou comme un système multi-machine. L'approche générateur/barre Infinie est simple et offre la possibilité de concevoir un régulateur décentralisé de tension.

Cependant, elle ne permet pas de prendre en compte les perturbations causées par les autres générateurs du réseau électrique. L'approche multi-machine intègre de façon systématique toutes les interactions dans le système mais elle ne permet pas la conception de régulateur décentralisé de tension. [13]

II.2. Synchronisation des alternateurs

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes [14] :

1. la tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau.
2. la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
3. la tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau.
4. la séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.

II.2.1. Alternateur branché sur un réseau infini [14] :

À l'exception des endroits isolés, il est assez rare que l'on soit obligé de coupler deux alternateurs en parallèle. Il arrive plus souvent que l'on branche un alternateur à un grand réseau comportant déjà plusieurs centaines d'alternateurs. Ce réseau est tellement puissant qu'il impose une tension et une fréquence constantes à tout appareil branché à ses bornes. C'est pourquoi on l'appelle réseau infini.

Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier. Quels sont donc les paramètres qui déterminent la puissance qu'il débite dans ces circonstances ?

La tension et la fréquence appliquées aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres :

- Le courant d'excitation I_x .
- le couple mécanique exercé par la turbine.

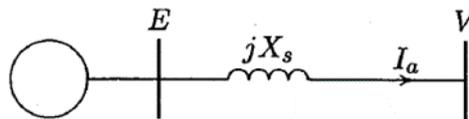


Figure II.1 : Machine synchrone connectée à un bus infini

II.2.2. Réseaux Electriques Multi-machines :

Les équations multi-machines peuvent être écrites de manière similaire au système à une machine connecté au bus infini. Afin de réduire la complexité de l'analyse de stabilité transitoire. Pour inclure la tension derrière réactances transitoires, les bus m sont ajoutés au réseau du système d'alimentation n-bus. Le réseau équivalent avec toutes les charges converties en admittances est représenté sur la figure (II.2)

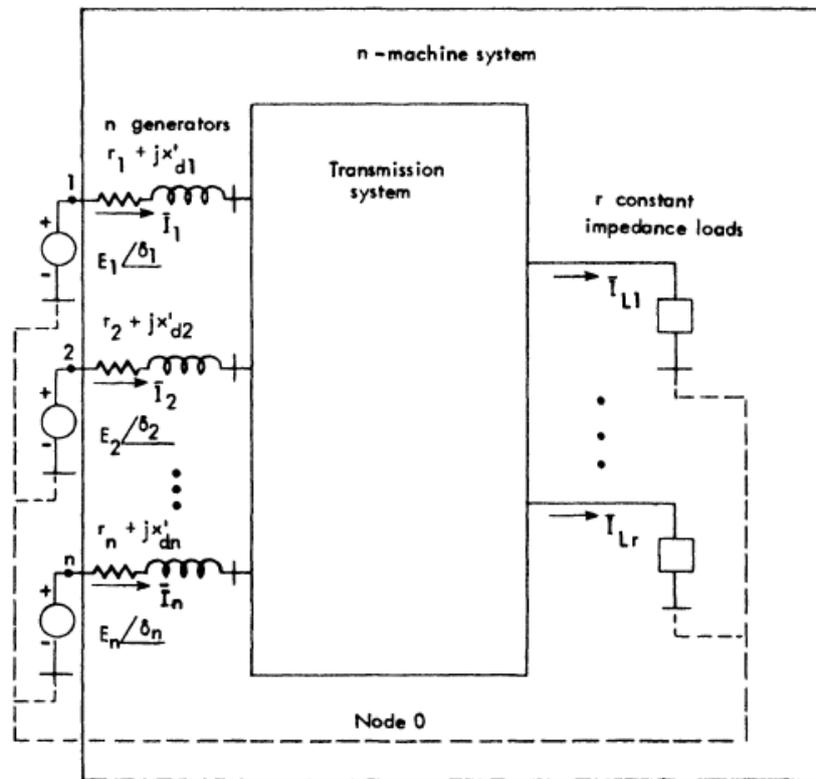


Figure II.2 : représentation du système d'alimentation d'analyse de stabilité transitoire. [15]

II.3. Modélisation de la machine synchrone :

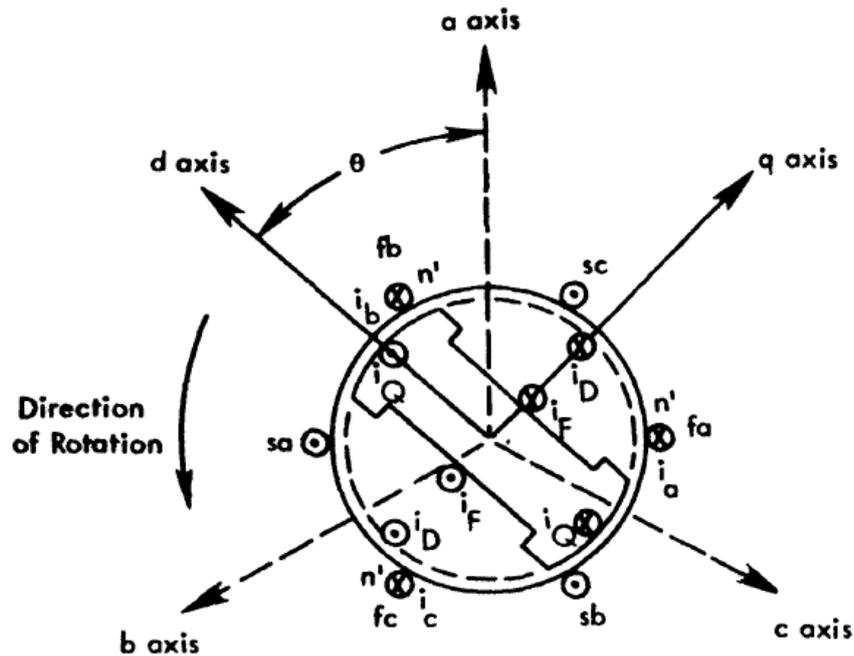


Figure II.3 : Représentation picturale de la machine synchrone. [15]

II.3.1. 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 dû, à la fois, à la rotation du rotor et à la géométrie des bobines et leurs emplacements dans la machines.

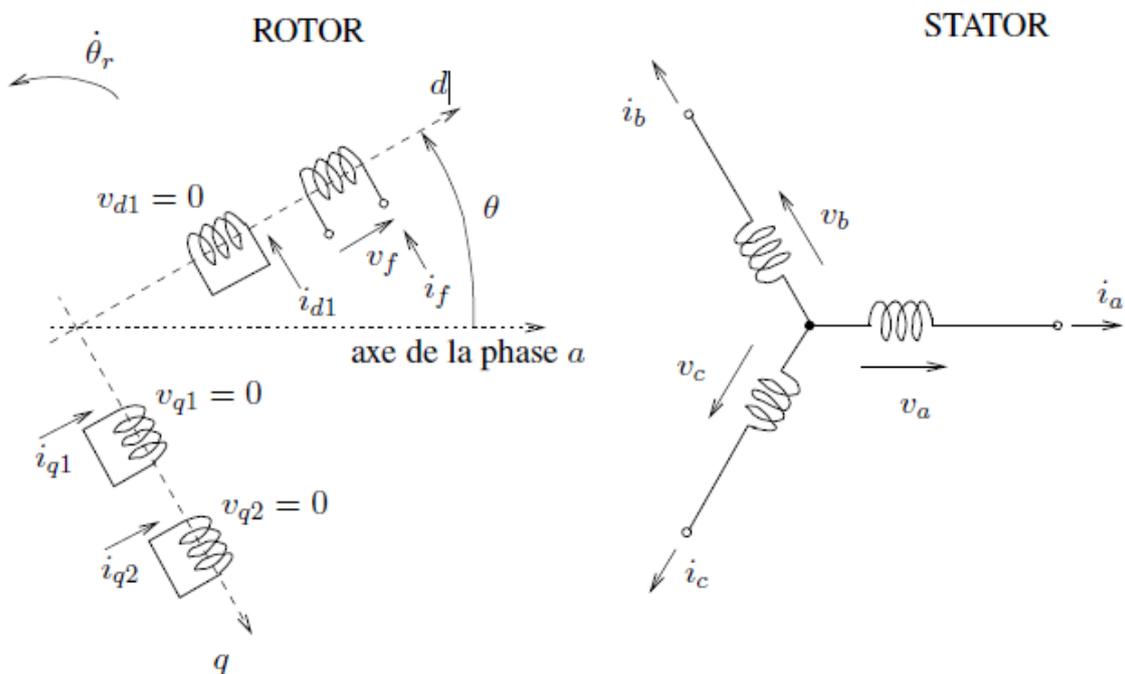


Figure II.4 : enroulements de la machine synchrone. [17]

◆équation des tensions (Stator), Pour les enroulements rotoriques on a de même :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = -R_s \cdot i_a - \frac{d\psi_a}{dt} \\ V_b = -R_s \cdot i_b - \frac{d\psi_b}{dt} \\ V_c = -R_s \cdot i_c - \frac{d\psi_c}{dt} \\ V_f = -R_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = -R_D \cdot i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ 0 = -R_Q \cdot i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \end{array} \right. \quad \text{Eq (II.1)}$$

AVEC

V_{abcf} : Tension aux bornes de l'enroulement.

R_s : La résistance d'une des phases.

ψ_{abcfDQ} : Le flux total embrassé par l'enroulement considéré.

i_{abcfDQ} : Courant dans l'enroulement.

Equation de flux :

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = l_{aa} \cdot i_a + l_{ab} \cdot i_b + l_{ac} \cdot i_c + l_{af} \cdot i_f + l_{aD} \cdot i_D + l_{aQ} \cdot i_Q \\ \psi_b = l_{ba} \cdot i_a + l_{bb} \cdot i_b + l_{bc} \cdot i_c + l_{bf} \cdot i_f + l_{bD} \cdot i_D + l_{bQ} \cdot i_Q \\ \psi_c = l_{ca} \cdot i_a + l_{cb} \cdot i_b + l_{cc} \cdot i_c + l_{cf} \cdot i_f + l_{cD} \cdot i_D + l_{cQ} \cdot i_Q \end{array} \right\} \quad \text{Eq (II.3)}$$

◆ **Définition des inductances [1] :**

Inductances propres statorique :

Les inductances propres statorique sont données par les relations suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} L_{aa} = L_s + L_m + \cos 2\theta \\ L_{bb} = L_s + L_m + \cos 2(\theta - 2\pi/3) \\ L_{cc} = L_s + L_m + \cos 2(\theta + 2\pi/3) \end{array} \right\} \quad \text{Eq (II.3)}$$

Avec $L_s > L_m$ et L_s, L_m sont des constantes

◆ Inductances propres rotorique

Si la saturation est négligée dans le circuit rotorique les inductances propres sont constantes et

Désignées par :

$$L_{FF}=L_F \quad L_{DD} = L_D \quad L_{QQ}=L_Q \quad \text{Eq(II.4)}$$

◆ Inductances mutuelles statorique

Les inductances mutuelles phase à phase du circuit statorique sont données par :

$$\left. \begin{aligned} L_{ab} = L_{ba} &= M_s - L_m \cos 2(\theta + \pi/6) \\ L_{bc} = L_{cb} &= M_s - L_m \cos 2(\theta - \pi/2) \\ L_{ca} = L_{ac} &= M_s - L_m \cos 2(\theta + 5\pi/6) \end{aligned} \right\} \quad \text{Eq(II.5)}$$

Avec $|M_s| > L_m$.

◆ Inductances mutuelles rotorique

L'inductance mutuelle entre le circuit inducteur F – F' et l'amortisseur D –D', est constante.

Le coefficient de couplage entre le circuit Q – Q' et les deux circuits D –D' et F – F' est nul

Car ils sont perpendiculaires. Donc :

$$L_{FD}=L_{DF} = M_R \quad L_{FQ}=L_{QF} =0 \quad L_{DQ}=L_{QD} =0 \quad \text{Eq(II.6)}$$

◆ Inductances mutuelles statorique-rotorique

Les inductances mutuelles entre le circuit statorique et le circuit rotorique sont :

$$\left. \begin{aligned} L_{aF} = L_{Fa} &= M_F + \cos \theta \\ L_{bF} = L_{Fb} &= M_F + \cos(\theta - 2\pi/3) \\ L_{cF} = L_{Fc} &= M_F \cos(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad \text{Eq(II.7)}$$

◆ Inductances mutuelles stator-amortisseur

Les inductances mutuelles entre le circuit statorique et le circuit d'amortisseur D – D' sont :

$$\left. \begin{aligned} L_{aD} = L_{Da} &= M_D + \cos \theta \\ L_{bD} = L_{Db} &= M_D + \cos(\theta - 2\pi/3) \\ L_{cD} = L_{Dc} &= M_D \cos(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad \text{Eq(II.8)}$$

Les inductances mutuelles entre le circuit statorique et le circuit d'amortisseur Q – Q' sont :

$$\left. \begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = M_D + \cos \theta \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = M_D + \cos(\theta - 2\pi/3) \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = M_D \cos(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \text{Eq(II.9)}$$

♦Equations des flux :

$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} L_{SS}(\theta) \\ L_{RS}(\theta) \end{array} \middle| \begin{array}{l} L_{SR}(\theta) \\ L_{RR} \end{array} \right\} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \text{Eq(II.10)}$$

Avec:

$$L_{RR} = \begin{pmatrix} L_{ff} & L_{fD} & 0 \\ L_{fD} & L_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & L_{QQ} \end{pmatrix} \text{Eq(II.11)}$$

$$L_{SS} = \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{pmatrix} \text{Eq(II.12)}$$

$$L_{SR} = L_{RS} \begin{pmatrix} L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \end{pmatrix} \text{Eq(II.13)}$$

II.3.2.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 :

$$\dot{\omega} = \frac{D}{2H}(\omega - \omega_s) + \frac{\omega_s}{2H}(p_m - p_e) \quad \text{Eq(II.14)}$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad \text{Eq(II.15)}$$

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

ω : la pulsation instantanée, vitesse instantanée.

$\omega_s = 2\pi f_0$: 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

II.3.3. Transformée de PARK :

La transformation de Park définie par la matrice de rotation P, permet de ramener les variables du repère triphasé (a,b,c) sur les axes d'un repère biphasé tournant (d,q). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. La transformation de Park est souvent définie par :

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta^-) & \cos(\theta^+) \\ \sin\theta & \sin(\theta^-) & \sin(\theta^+) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (II.16)}$$

Avec :

$$\theta^- = \theta - \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta^+ = \theta + \frac{2\pi}{3}$$

$$i_d = K_d [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta^-) + i_c \cos(\theta^+)] \quad \text{Eq(II.17)}$$

$$i_q = K_q [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta^-) + i_c \sin(\theta^+)] \quad \text{Eq(II.18)}$$

$$i_0 = K_0 (i_a + i_b + i_c) \quad \text{Eq(II.19)}$$

La projection des courants i_a, i_b, i_c , sur l'axe d (voir figure II.3) donne le système d'équation suivant :

$$i_{0dq} = P i_{abc} \quad \text{Eq (II.20)}$$

Pour définir les vecteurs des courants

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = P(\theta) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = P^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} \quad \text{Eq (II.21)}$$

$$K_d = K_q = \frac{\sqrt{2}}{3} \quad \text{La plus utilisé}$$

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

◆Les équations des tensions transformées :

L'application de la transformée de PARK sur les équations de la machine électrique, conduit aux équations suivant :

$$v_d = -\dot{\psi}_d - R_s i_d - \omega \psi_q$$

$$v_q = -\dot{\psi}_q - R_s i_q + \omega \psi_d$$

$$v_f = \dot{\psi}_f + R_f i_f \quad \text{Eq (II.22)}$$

$$0 = \dot{\psi}_D + R_D i_D$$

$$0 = \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q$$

Avec :

V_d, V_q, V_f représentent respectivement les tensions aux bornes des enroulements sur les axes d, q et f

$e_d = \dot{\psi}_d$: c'est la f. e. m de transformation

- De la même manière que les équations de tension, l'application de la transformation de Park aux équations de flux donne :

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & KM_f & KM_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & KM_Q \\ KM_f & 0 & L_f & M_R & 0 \\ KM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & KM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad \text{Eq (II.23)}$$

Avec :

L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q , : respectivement les inductances propres d'axe direct, d'axe en quadrature, de l'inducteur ou roue polaire, des amortisseurs d'axe direct et d'axe en quadrature.

M_R, M_f, M_D, M_Q : Respectivement la mutuelle inductance entre, l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct, stator et inducteur, stator et l'amortisseur d'axe direct, stator et l'amortisseur d'axe en quadrature.

$\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_D, \psi_Q$: Respectivement le flux, sur l'axe direct, sur l'axe en quadrature, de l'inducteur, des amortisseurs d'axe direct et d'axe en quadrature.

I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q , respectivement le courant qui traverse l'enroulement, d'axe direct, d'axe en quadrature, de la roue polaire, des amortisseurs d'axe direct et d'axe en quadrature.

K : coefficient constant induit par la transformation de **PARK**, $K = (2/3)^{\frac{1}{2}}$

➤ **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

II.4. 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.

$$\dot{E}_q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R \frac{KM_f}{L_f} \right] \psi_f \quad \text{Eq (II.24)}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R KM_f i_f \right] \quad \text{Eq (II.25)}$$

$$E_{fd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\omega_R \frac{KM_f}{r_f} \right] v_f \quad \text{Eq (II.26)}$$

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

$$V_q = \dot{E}_q + \dot{X}_d I_d \quad \text{Eq (II.27)}$$

$$V_d = -\dot{X}_d I_d \quad \text{Eq (II.28)}$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \text{Eq (II.29)}$$

Avec :

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.

\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].

$$\dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{do}} (E_{fd} - \dot{E}_q + (X_d - \dot{X}_d) I_d) \quad \text{Eq (II.30)}$$

Avec :

T_{d0} : La constante de temps transitoire d'axe d lorsque les enroulements du stator sont ouverts

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 :

$$P_e = \dot{E}_q I_q \tag{II.31}$$

II.5.Lignes de transmission

◆Le repère D-Q :

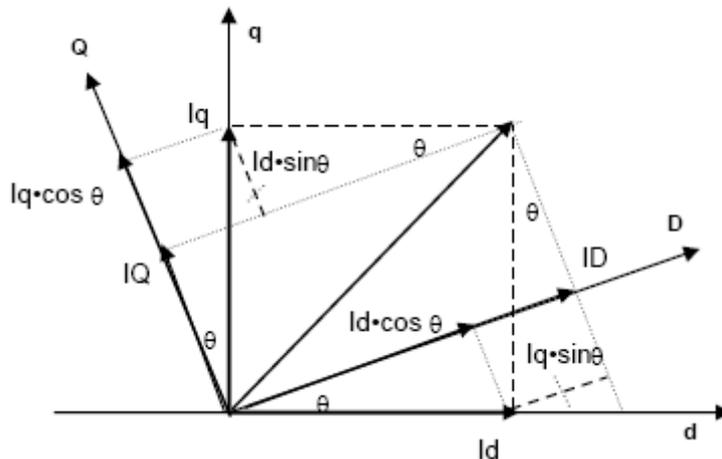


Figure II.5 : Repère D-Q de la transformation Vectorielle

$$ID = Id \cdot \cos\theta + Iq \cdot \sin\theta \tag{II.32}$$

$$IQ = -Id \cdot \sin\theta + Iq \cdot \cos\theta \tag{II.33}$$

◆ Calcul de la matrice admittance

La matrice d'admittance [Y] est calculée suivant les étapes ci-après [16] :

- 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.

♦ **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 :

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{V}] \quad \text{Eq(II.34)}$$

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

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

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

$$[\bar{I}] = \begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{0} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (II.35)}$$

Nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{GG} & \bar{Y}_{GL} \\ \bar{Y}_{LL} & \bar{Y}_{LG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_G \\ \bar{V}_L \end{bmatrix} \quad \text{Eq (II.36)}$$

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

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_{GG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad \text{Eq (II.37)}$$

Et au niveau des nœuds des charges nous aurons :

$$[\bar{0}] = [\bar{Y}_{LG}] \cdot [\bar{V}_G] + [\bar{Y}_{LL}] \cdot [\bar{V}_L] \quad \text{Eq (II.38)}$$

En tirant l'expression à partir de (II.36) et en la substituant dans (II.35), nous obtenons l'expression qui lie les courants et les tensions au niveau des nœuds des générateurs.

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}] \cdot [\bar{V}_G] \quad \text{Eq (II.39)}$$

La matrice réduite définie par :

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{GG}] - [\bar{Y}_{GL}] \cdot [\bar{Y}_{LL}]^{-1} \cdot [\bar{Y}_{LG}] \quad \text{Eq (II.40)}$$

Avec:

\bar{I} : Vecteur du courant dans les coordonnées communes.

\bar{V} : Vecteur de la tension de sortie des coordonnées communes.

\bar{Y} : Matrice des admittances du réseau.

\bar{Y}_r : la matrice d'admittance réduite du réseau électrique.

◆ Calcul des Courants

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

$$[\bar{I}_G] = [\bar{Y}_r] \cdot [\bar{V}_G] \quad \text{Eq (II.41)}$$

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 [18].

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad \text{Eq (II.42)}$$

$$I_{di} = \sum_{k=0}^n \dot{E}_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad \text{Eq (II.43)}$$

Avec: $i = 1 \dots n$

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{ik}]_{\substack{i=1,\dots,n \\ k=1,\dots,n}} \quad \text{Eq (II.44)}$$

$$\bar{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\theta_{ik}} \quad \text{Eq (II.45)}$$

II.6. Modèle non linéaire d'un réseau de puissance infinie :

Soit le réseau électrique a n générateurs. Le Modèle non-Linéaire est le Suivant [18] :

$$\dot{\omega} = \frac{D}{2H} (\omega - \omega_s) + \frac{\omega_s}{2H} (p_m - p_e) \quad \text{Eq (II.46)}$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad \text{Eq (II.47)}$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - \dot{E}'_q + (X_d - X'_d)I_d) \quad \text{Eq (II.48)}$$

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad \text{Eq (II.49)}$$

$$I_{di} = \sum_{k=0}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad \text{Eq (II.50)}$$

$$P_e = E'_q I_d \quad \text{Eq (II.51)}$$

$$V_{qi} = E_q + X_{di} I_{di} \quad \text{Eq (II.52)}$$

$$V_{di} = -X'_{di} I_{di} \quad \text{Eq (II.53)}$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad \text{Eq (II.54)}$$

Avec $i=1, \dots$, nombre de Générateurs

II.7.Simulation

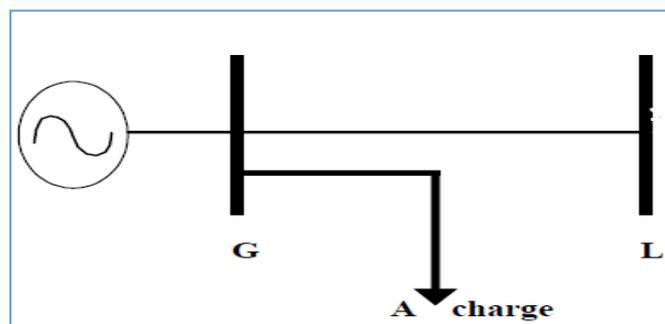


Figure II.7 : Topologie du réseau électrique à une machine a bus infini

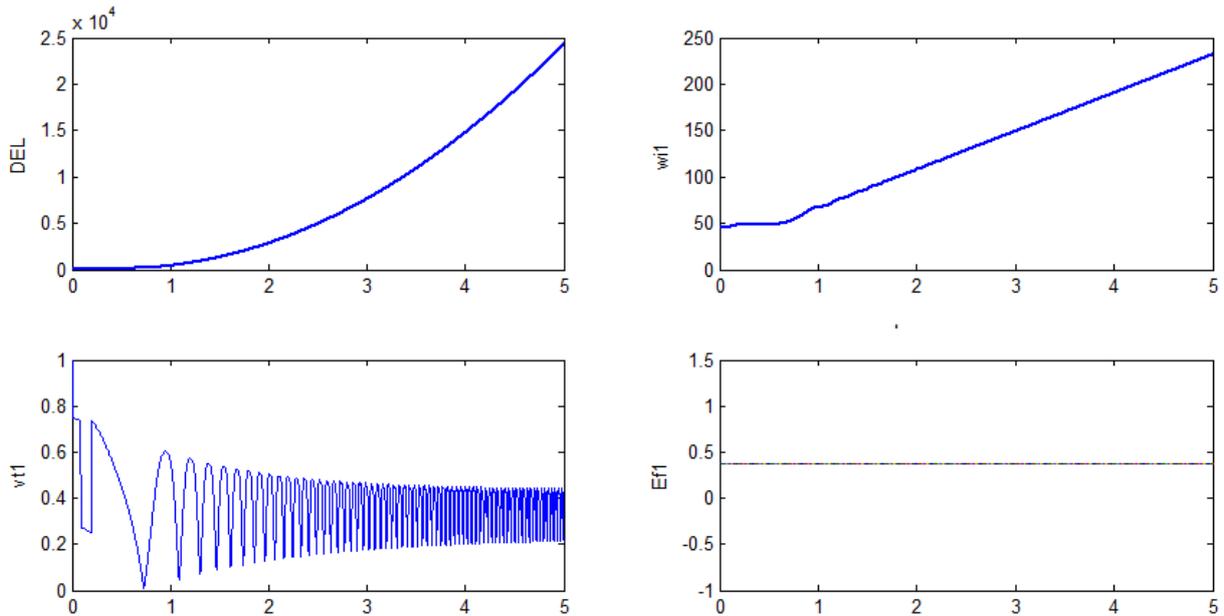


Figure II.7 : Réponse du système à une machine avec court-circuit sans réglage.

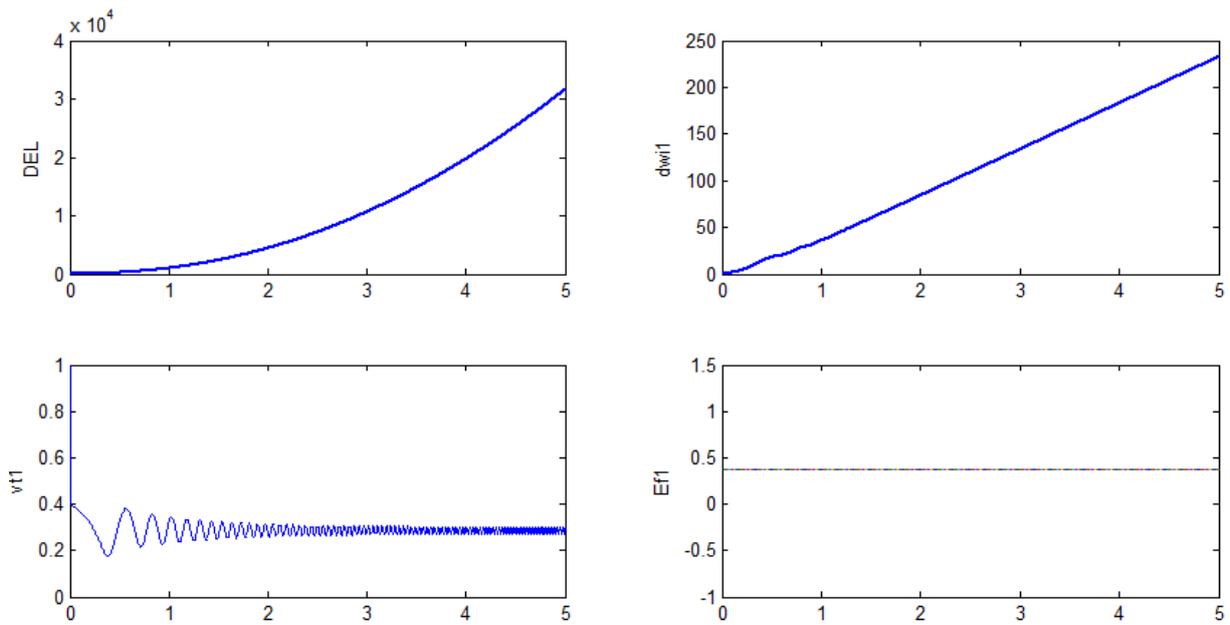


Figure II.8 : Réponse du système à une machine avec une augmentation de 20% de la puissance mécanique sans réglage

II.7.1.L'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique :

La figure (II.8) pour le système à une machine, montrent que le système se déstabilise sous L'effet d'un accroissement brutal 20% de la puissance mécanique fournie à la machine est appliqué à l'instant $t = 0.1$ (s), et le point de fonctionnement change.

II.7.2.L'effet d'un court-circuit triphasé :

La figure (II.7) montre que le système se déstabilise sous l'effet d'un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t = 0.1$ (s) sur la ligne liant la machine au nœud infini.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un réseau d'énergie électrique on a décrit les différentes parties constituantes d'un réseau, et présenté les équations mathématiques qui permettent de les modéliser pour les études de la stabilité transitoire (aux grandes perturbations à court terme), les étapes de son évaluation ont été données :

- Etablir le modèle non-linéaire du système,
- Trouver l'écoulement de l'énergie (généralement donné),
- Trouver le régime établi (le point de fonctionnement),
- Connaitre les paramètres nécessaires

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.

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Chapitre

III

III. Introduction

Actuellement la commande adaptative est d'une grande importance dans le domaine de contrôle. Cette commande est dominante dans les systèmes qui présentent des incertitudes, des perturbations structurales et des variations de l'environnement. Le principale objet de la commande adaptative est la synthèse de la loi d'adaptation, pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs des boucles de commande, afin de réaliser ou de maintenir un certain niveau de performance quand les paramètres du procédé à commander sont difficiles à déterminer ou variant avec le temps. L'intérêt de la commande adaptative apparait essentiellement au niveau des perturbations paramétriques, c'est-à-dire agissant sur les caractéristiques du processus à commander, les perturbations agissant sur les variables à réguler ou à commander [19].

III.1. Représentation d'état des systèmes :

Toutes les méthodes étudiées jusqu'à présent de l'asservissement linéaire restent valables et efficaces jusqu'à ce que ces systèmes atteignent une complexité telle que l'on ne puisse plus se satisfaire de l'unique relation entrée-sortie (c'est-à-dire les systèmes mono variables SISO : **single input single output**) pour les commander correctement. De même, ces modèles deviennent difficiles à mettre en œuvre lorsque les systèmes étudiés possèdent plusieurs entrées et plusieurs sorties cas d'un système multi variable (MIMO : **Multi Input Multi Output**).

Les théories de commande avancées sont basées complètement sur les modélisations modernes sous la forme des variables d'état. La représentation d'état des systèmes et un outil puissant permettant de modéliser le fonctionnement des systèmes linéaires, en temps continu ou en temps discret et qui possède en outre l'avantage de conserver la représentation temporelle des phénomènes.

III.2. Différentes topologie de la commande adaptative :

III.2.1. Commande adaptative indirecte :

Le schéma de commande auto-ajustable donnée figure (III.1) est un schéma de commande adaptative « indirecte » car les paramètres du régulateur se fait en deux étapes [20].

- Estimation des paramètres du modèle de procédé
- Calcul des paramètres du régulateur à partir des paramètres estimés.

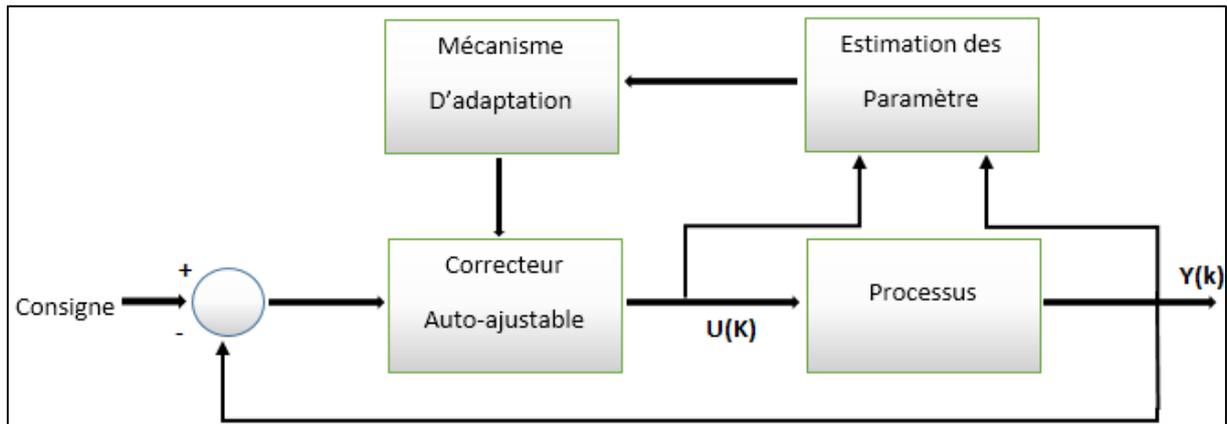


Fig (III.1) : Commande Adaptative indirecte

Dans le schéma de commande adaptative indirecte la commande se calcule à partir des paramètres estimés des procédés et elle s'applique simultanément au procédé et au prédicteur. On déduit que la sortie de prédicteur va se comporter en concordance avec les performances désirées quelles que soient les valeurs des paramètres estimés.

III.2.2. commande adaptative directe :

Commande adaptative directe et une approche très attrayante en raison de sa simplicité et de l'élimination de certains problèmes numériques associés dans beaucoup de cas aux calculs de commande à partir des paramètres estimés du procédé [21].

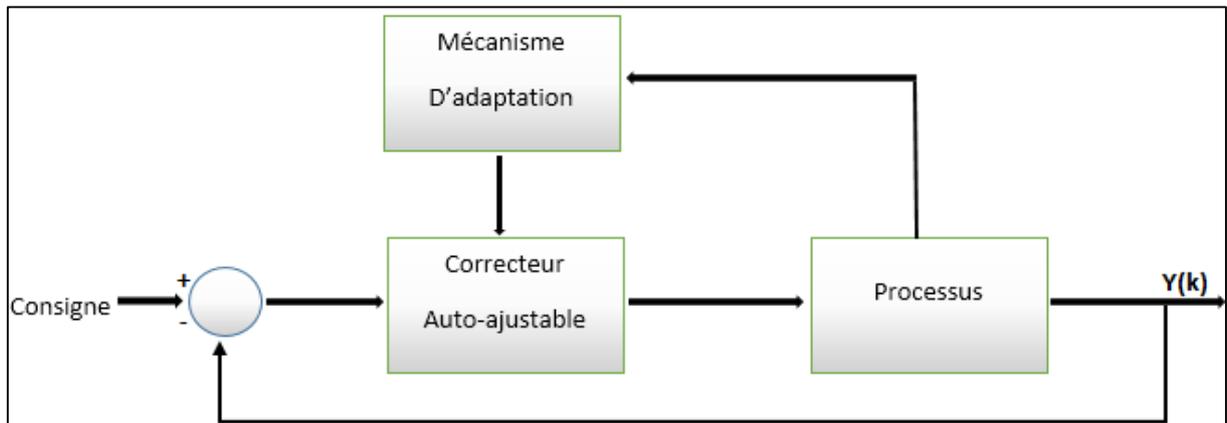


Fig (III.2) : Commande adaptative directe

III.2.3. commande adaptative à modèle de référence :

Plusieurs recherches ont été développées pour aboutir à diverses structures de systèmes adaptatifs à modèle de référence. Ces dernières sont utilisées dans de larges domaines pour résoudre une variété importante de problèmes rencontrés en commande, identification et

estimation d'état. De tels système sont composés par deux boucles fermées ; une boucle interne principale et l'autre externe [19].

La boucle interne comprend le système à commander et le régulateur dont les que la différence entre la sortie du modèle de référence et celle du processus soit minimale.

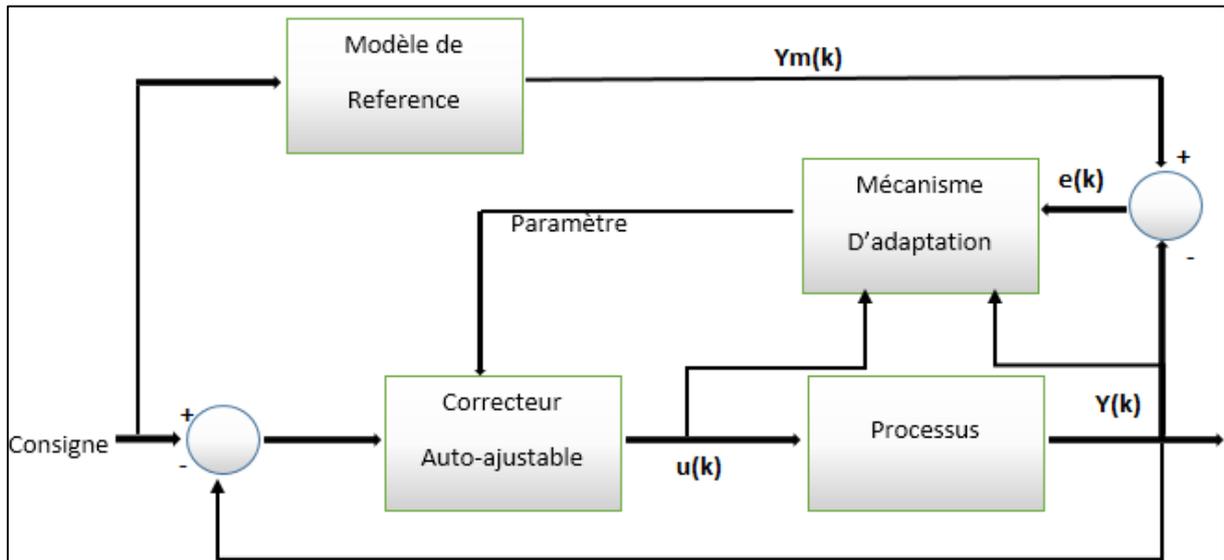


Fig (III.3) : schéma de commande adaptative à modèle de référence

Pour concevoir une commande adaptative à modèle de référence, il faut remplir certaines hypothèses en considérant deux cas : idéal et général.

Dans le cas idéal, les hypothèses suivantes sont émises, à savoir : [22]

- Le modèle de référence doit être un modèle de système linéaire invariante dans le temps.
- Le modèle de référence et le système à commander doivent être de même ordre ;

En cas d'adaptation paramétrique, tous les paramètres de système à commander doivent être accessibles pour l'adaptation.

- Durant le processus d'adaptation, les paramètres du système ajustable dépendent seulement du mécanisme d'adaptation (condition de non stationnaire)
- Aucun signal autre que celui du vecteur d'entrée, n'agit sur le système.
- La différence initiale entre les paramètres du modèle et ceux du système est connue.
- Le vecteur d'état d'entrée et de sortie est mesurable.

Cependant, dans les situations réelles, les conditions énumérées ci-dessus, ne sont pas toujours respectées. En effet, dans le cas général on a :

- Le modèle de référence est un système non linéaire variable dans le temps.
- Le système ajustable est un système non linéaire variable dans le temps.
- Le modèle de référence et le système ajustable n'ont pas la même dimension.
- Durant le processus d'adaptation, les paramètres du système ajustable ne dépendent pas seulement du mécanisme d'adaptation mais ils sont aussi soumis à d'autres perturbations paramétriques ; Par rapport à tous les paramètres, le système peut être en boucle ouverte ; Les perturbations sont appliquées à différentes parties du système ; La mesure du vecteur d'erreur est toujours affectée par un bruit additif.

Nous présentons par la suite une étude sur la théorie de la commande adaptative à modèle de référence. On décrira la méthode couramment utilisée, il s'agit de : méthode basées sur la stabilité de Lyapunov.

III.2.3.1. Méthode basée sur la stabilité de Lyapunov :

Une fonction de Lyapunov peut être choisie comme suit :

$$v=V(\theta, e, t) \quad \text{Eq (III.1)}$$

Ou :

θ : Vecteur des paramètres du contrôleur.

L'approche de Lyapunov offre de stabilité globale pour n'importe quelle restriction, soit en utilisant les conditions initiales de l'erreur ou les entrées du système. L'avantage que présente cette approche et la nécessité de trouver une fonction de Lyapunov appropriée, la méthode de Lyapunov est appliquée pour la synthèse d'une commande adaptative à modèle de référence [21].

La fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V=e^2 + \beta \cdot x^2 \quad \text{Eq (III.2)}$$

Ou β est une constante positive et $x = km + Kp$

Si V est négative donc assurent une convergence globalement asymptotique de l'erreur vers zéro.

Les recherches de Lyapunov ont rapidement évoluées ainsi des extensions du concept de base se sont apparues, les lois adaptatives sont classées comme suit :

Modification de l'entrée et synthèse de la boucle déterreur « input modification and feed-back synthèse »

Pour examiner ces deux méthodes, on est obligé d'établir une représentation du système et du modèle de référence.

Le système est décrit par :

$$\dot{X} = A \cdot x + B \cdot u \quad \text{Eq (III.3)}$$

Le modèle de référence est décrit par :

$$\dot{X}_m = A_m \cdot x + B_m \cdot u_m \quad \text{Eq (III.4)}$$

A_m : est une matrice d'Hurwitz.

L'erreur ($e = \dot{X}_m - \dot{X}$)

III.3. commande adaptative : classe de système non linéaire :

Notons que les systèmes de commande adaptative, même s'il s'agit de la commande d'un système linéaire a paramètres du régulateur dépendent des variables de procédé a travers le mécanisme d'adaptation. Ceci explique les difficultés des analyses et de synthèse de tels systèmes [23].

Les systèmes de commande adaptative contiennent deux boucles de contre- réaction :

Boucle interne, de type conventionnel mais ayant un régulateur ajustable.

Boucle externe agissant sur commande à travers le changement des paramètres.

De ce fait, il est tout d'abord nécessaire de bien spécifier les algorithmes de la commande utilisés pour boucle de régulation conventionnelle ; ces algorithmes seront complétés par les algorithmes d'adaptation dans une étape ultérieure.

III.3.1. la transformation des systèmes non- linéaires :

III.3.1.1. Position de problèmes :

On considère une classe des systèmes non linéaires mono entrée mono sortie (SISO) non affines en la commande, dont la dynamique est décrite par les équations différentielles suivantes [11] :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (\text{III.1})$$

$$y = h(x)$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état $u \in \mathbb{R}$ et $y \in \mathbb{R}$ sont respectivement l'entrée et la sortie du système (III.1) et $f(x, u)$ est une fonction continue non affine inconnue, et $h(x)$ est une fonction scalaire. Sont supposés non linéaires de forme analytique inconnue.

Considérons la structure de la commande du système non linéaire non affine sous forme générale (III.1), cette structure ne permet pas d'avoir une relation directe entre l'entrée u et la sortie du système y , ce qui rend la mise en œuvre d'une commande en poursuite d'une trajectoire de référence. Pour remédier à ce problème les techniques de la géométrie différentielle [25] telles que **la dérivée de Lie, crochet de Lie**, le difféomorphisme, sont utilisés pour transformer le modèle du système vers la norme normale.

III.3.1.2. Représentation entrée-sortie :

L'objectif de la présentation entrée-sortie est de trouver une relation directe entre la sortie du système (III.1) et son entrée. Pour exprimer explicitement cette relation, il est nécessaire de dériver itérativement la sortie du système jusqu'à l'apparition de l'entrée u .

On obtient alors [26] :

$$\begin{aligned} y &= h(x) \\ \dot{y} &= L_f h(x) \\ \ddot{y} &= L_f^2 h(x) \\ &\vdots \\ y^{(p)} &= L_f^p h(x) \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial t} = \frac{\partial h(x)}{\partial t} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial [h(x)]}{\partial t} \dot{x} = \frac{\partial [h(x)]}{\partial t} f(x, u) \quad (\text{III.3})$$

La relation entrée-sortie du système (III.1) est donc la suivante :

$$y^{(p)} = L_f^p h(x)$$

La notion $L_f h(x)$ est une dérivée de Lie qui signifie la dérivée de $h(x)$ dans la direction de

$$L_f h(x) = \frac{\partial[h(x)]}{\partial t} f(x, u)$$

P : le nombre de dérivées nécessaires pour qu'au moins une des entrées apparaisse, et est connu sous le nom du degré relatif correspondant à la sortie y .

Les dérivés de lie d'ordre supérieur peuvent être définis périodiquement comme suit :

$$L_f^k h = L_f(L_f^{(k-1)}), k > 0$$

Le degré relatif représente le retard subi par l'entrée avant son influence sur la sortie y . si le degré relatif p est égal à l'ordre du système, le système (III.1) est dit dans sa forme normale et ne présente pas de dynamiques de zéros est donc à minimum de phase. Si p est strictement inférieur à n , le système (III.1) est à minimum de phase [25] [26] si le sous-système d'ordre $(n-p)$ est asymptotiquement stable (stabilité de la dynamique de zéros).

Définition :

On dit que le système (III.1) possède un degré relatif p à (x_0, u_0) , s'il existe un nombre entier positif $1 \leq p < \infty$ tels que

$$\forall x \in R: \frac{\partial[L_f^i h]}{\partial u} = 0, i = 0, 1, \dots, p-1$$

$$: \frac{\partial[L_f^p h]}{\partial u} \neq 0$$

Avec $\Omega_x \in R$ et $\Omega_u \in R$ est un ensemble compacts contenant x_0 et u_0 respectivement. Le système (III.1) est un système qui possède un degré relatif complet p dans un ensemble compact $= \Omega_x \times \Omega_u$. S'il a un degré relatif p de tout point $(x_0, u_0) \in U$.

Hypothèse 1. :

Le système (III.1) possède un degré relatif complet $p=n$, $\forall (x, u) \in U$. On peut donc trouver la forme normale de système en appliquant le changement de coordonnées (un difféomorphisme) $\phi(x) = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T$ avec $\phi_j(x) = L_f^j h(x), j = 1, 2, 3, \dots, n$, est une matrice jacobéenne qui est non singulière pour tous $x \in \Omega$ [17] donc $\phi(x)$ est un difféomorphisme sur Ω_x et $\xi = \phi(x)$ tel que :

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \dots \\ \xi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \phi_3(x) \\ \dots \\ \phi_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f(x) \\ L_f^2 h(x) \\ \dots \\ L_f^{p-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Alors, (I.1) peut être transformé en une forme normale :

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &\doteq \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &\doteq \xi_3 \\ &\dots\dots \\ \dot{\xi}_n &= \dot{b}(\xi, u) \\ y &= \xi_1 \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

On peut alors facilement vérifier que :

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \xi_{i+1}, i = 1 \dots\dots n - 1 \\ \dot{\xi}_n &= \dot{b}(\xi, u) \\ y &= \xi_1 \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Où :

$$b(\xi, u) = L_f^n h(\xi)$$

Avec :

$$x = \phi^{-1}(\xi)$$

Définir le domaine du système normal (III.6), comme suit :

Soit la fonction

$$\bar{U} = \left\{ \frac{\xi, u}{\xi \phi(\Omega_x)}, u \in \Omega_u \right\} \quad (\text{III.7})$$

$$b_u = \partial \left[\frac{b(\xi, u)}{\partial u} \right]$$

Et la fonction continue :

$$\dot{b}_u = d(b_u/dt)$$

Selon l'hypothèse (III.1) et la définition (III.1), nous avons $\partial[b(\xi, u)/\partial u \neq 0, \forall(\xi, u) \in \bar{U}$. Cela implique que la fonction b_u est strictement positive ou négative pour tous, $\forall(\xi, u) \in \bar{U}$.

Supposons que le signe de b_u est connu, et sans perte de généralité, il est supposé que $b_u > 0$ dans la discussion qui suit

Hypothèse 2. [27] : il existe des constantes positives g_0 , et g_1 de telle sorte que

$$g_0 \leq b_u \leq g_1 \tag{III.8}$$

Avec

$$\left| \frac{d}{dt} [b(\xi, u)/\partial u] \right| \leq H < \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)} g_0 \tag{III.9}$$

Pour tous $(\xi, u) \in \bar{U}$, avec $\lambda_{\min}(Q)$ et $\lambda_{\max}(P)$ sont les valeurs propres minimale et maximale des matrices Q et P respectivement données par l'équation $A_k^T P + P A_k = -Q$

Hypothèse 3. [27] : la trajectoire désirée $\bar{\xi}_d(t)$ et ses dérivées jusqu'à l'ordre sont connues et bornées.

Si l'on définit l'erreur de poursuite par

$$\check{\xi}_1(t) = y_d(t) - \xi(t) \tag{III.10}$$

Et le vecteur d'erreur de poursuite de tous les états est défini par

$$\check{\xi} = \xi_d - \xi = [\check{\xi}, \dot{\check{\xi}}, \ddot{\check{\xi}}, \dots, \check{\xi}^{(n-1)}]^T$$

Avec $\xi_d(t) = [\check{\xi}, \dot{\check{\xi}}, \ddot{\check{\xi}}, \dots, \check{\xi}^{(n-1)}]^T \in R^n$ et $\bar{\xi}_d = [\xi_d^T, \xi_d^n]^T \in R^{n-1}$

La dynamique des erreurs de poursuite sera alors donnée par :

$$\dot{\check{\xi}} = A \check{\xi} + b [-b(\xi, u) + y_d^{(n)}] \tag{III.11}$$

Avec $A = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} & I_{(n-1)} \\ 0 & 0_{(n-1)}^T \end{bmatrix} \in R^{(n) \times (n)}$, $b = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} \\ 1 \end{bmatrix} \in R^{(n) \times 1}$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} & I_{(n-1)} \\ 0 & 0_{(n-1)}^T \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Où $I_{(n-1)}$ et $0_{(n-1)}$ indiquer la matrice d'identité et un vecteur de zéros de dimension (n-1), respectivement

Théorème de la fonction implicite [28] :

Soit h une fonction continue et dérivable en chaque point (a,b) , de l'ensemble ouvert $S \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \subset \mathfrak{R} \times \mathfrak{R}$. Soit (a_0, b_0) , un point dans S , pour le quel $h(a_0, b_0)=0$ et telle que la matrice jacobienne $[\delta h / \delta a](a_0, b_0)$ est non singulière. Alors, il existe sur un voisinage $U \times V \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ du point (a_0, b_0) , solution unique de l'équation $h(a,b)=0$ pour chaque point $b \in V$ et $a \in U$. De plus la solution peut être donnée comme suit $a = g(b)$, où g est continue et dérivable en $b=b_0$.

Lemme.1 [29] : on considère le système(III.6) satisfaisant les suppositions, alors il existe un contrôleur idéal

$$\dot{\xi} = (A - b\underline{k}^T)\xi \tag{III.12}$$

Avec

$$A_k = (A - b\underline{k}^T)$$

Le vecteur de gain de retour d'état \underline{K} est calculé afin que la matrice $(A - b\underline{k}^T)$ ait toutes ses valeurs propres à parties réelles négatives. Par conséquent le système bouclé sera exponentiellement stable. On lui associe une équation de Lyapunov, ayant pour solution unique une matrice symétrique définie positive, donnée par

$$A_k^T P + P A_k = -Q \tag{III.13}$$

III.4. La commande linéarisant :

Après avoir définie une structure permettant d'obtenir une relation directe entre l'entrée et la sortie du système, et une transformation qui permet d'avoir une forme affine d'un système non linéaire qui peut être appliquée simplement à une classe de systèmes non linéaires décrits par ce qu'on appelle la forme canonique si sa dynamique est représentée par [23] :

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \xi_{i+1}, i = 1 \dots n - 1 \\ \dot{\xi}_n &= f(z) + \dot{g}(z)u + d \end{aligned} \tag{III.14}$$

$$y = \xi_1$$

Ou $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n]^T \in R^n$ et le vecteur d'état, $u \in R$ et $y \in R$, sont respectivement l'entrée et la sortie du système, $f(z)$ et $g(z)$ sont des fonctions non linéaires continues incertaines.

Pour cela on détermine une loi d'adaptation pour ajuster le vecteur des paramètres tel que les conditions suivantes soient satisfaites :

- (i) Le système en boucle fermé doit être stable et robuste dans le sens où toutes les variables estimées soient uniformément bornées.
- (ii) L'erreur de poursuite, doit être la plus petite possible.

Le système (III.14) peut être réécrit sous la représentation d'état suivante :

$$\dot{\xi} = A\xi + b[-b(\xi, u) + y_d^{(n)}] \tag{III.15}$$

$$y = c^T \xi$$

Où

$$\begin{bmatrix} 0_{(n-1)} & I_{(n-1)} \\ 0 & 0_{(n-1)}^T \end{bmatrix} \in R^{(n) \times (n)}, b = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} \\ 1 \end{bmatrix} \in R^{(n) \times 1}, c = \begin{bmatrix} 0_{(n-1)} \\ 1 \end{bmatrix} \in R^{(n) \times 1} \tag{III.16}$$

Où $I_{(n-1)}$ et $0_{(n-1)}$ indiquent la matrice d'identité et un vecteur de zéros de dimension (n-1), respectivement

En remplaçant la fonction $b(\xi, u)$ par leur transformation équivalente dans l'équation dynamique de l'erreur (III.11), on obtient :

$$\dot{\xi} = A\xi + b[-f(z) - g(z)u + y_d^{(n)} - d] \tag{III.17}$$

Si les fonctions non linéaires $f(z)$ et $g(z)$ sont connues, les objectifs de commande peuvent être atteints en choisissant la loi de commande idéale suivante [23] :

$$u^* = \frac{1}{g(z)} [-f(z) + y_d^{(n)}(t) + \underline{k}^T \xi(t)] \tag{III.18}$$

Ou $\underline{k}^T = [k_0, k_1, \dots, k_{n-1}]$ est le vecteur de gain de retour d'état, par substitution l'équation (III.18) par l'équation (III.14) l'équation suivante est obtenue en considérant $d=0$:

$$\xi^n + k_1 \xi^{n-1} + \dots + k_{(n)} \xi = 0 \tag{III.19}$$

Les coefficients, $k_j, j = 0, \dots, n - 1$ sont choisis de façon à ce que le polynôme :

$S^{(n)} + k_{n-1}S^{(n-1)} + \dots + k_0 = 0$. Soit hurwitzien (racines à partie réelle négative), qui prouve la convergence de l'erreur de suivi de trajectoire $\xi(t)$ vers zéro quand $t \rightarrow \infty$, c'est-à-dire :

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \|\tilde{\xi}\|^2 = 0 \quad (\text{III.20})$$

Cependant, les fonctions sont inconnues et la perturbation extérieure existe, donc il est difficile d'appliquer la loi de commande (III.18) pour le système non linéaire(III.14).

Hypothèse 4 : les erreurs d'approximation sont bornées comme suit [23] :

$$|\varepsilon_f(z)| \leq \bar{\varepsilon}_f \text{ et } |\varepsilon_g(z)| \leq \bar{\varepsilon}_g$$

Où $\bar{\varepsilon}_f$ et $\bar{\varepsilon}_g$ sont des constantes positives inconnues :

Considérons maintenant la loi de commande suivante :

$$u = \frac{1}{\hat{g}(z/w_g)} \left[-\hat{f}(z/w_f) + y_d^{(n)}(t) + \underline{k}^T \tilde{\xi}(t) \right] \quad (\text{III.21})$$

Cette loi de commande résulte de (III.18) en remplaçant les fonctions $f(z)$ et $g(z)$ par leurs approximations $\hat{f}(z/w_f)$ et $\hat{g}(z/w_g)$ et elle ne peut garantir à elle seule la stabilité du système bouclé. Ceci est dû, d'une part, à l'existence des erreurs d'approximation et, d'autre part, au fait que cette loi de commande n'est pas définie lorsque $\hat{g}(z/w_g) = 0$

III.5 Analyse de stabilité :

Pour démontrer la stabilité de la commande adaptative, nous avons procédé en deux étapes [23] :

En premier lieu nous démontrons que les lois d'adaptation qui gardent les paramètres ajustable sont bornées

En deuxième lieu, nous démontrons la stabilité de la dynamique de l'erreur en boucle fermée.

III.6 conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes topologies de la commande adaptative, ce qui nous permet d'obtenir un modèle mathématique qui représente le plus fidèlement possible le comportement dynamique d'un processus. Donc, la commande adaptative fait partie d'un ensemble de technique destinées à ajuster automatiquement les paramètres du correcteur des systèmes de commande lorsque les caractéristiques du processus et les perturbations sont inconnues ou varient dans le temps. Par principe, ce type de commande est non-linéaire puisqu'il comporte deux boucles de contre réaction imbriquées : la boucle de correction et la boucle d'adaptation.

An ornate, black and white decorative border with intricate scrollwork and flourishes, framing the central text. The border is rectangular with rounded corners and features a double-line effect.

Chapitre

IV

IV.1. Introduction

On appelle système flou tout système utilisant des ensembles flous et la structure correspondante pour donner une formulation mathématique afin de relier la sortie du système à son entrée. Cette formulation mathématique est obtenue en décrivant le chemin de cette sortie qui passe à travers trois blocs de base. Un fuzzificateur qui convertie l'entrée en un ensemble flou, un mécanisme d'inférence qui combine les règles pour obtenir un ensemble flou de sortie, et un défuzzificateur qui transforme cet ensemble en une sortie numérique [31].

Chaque système basé sur la logique floue contient quatre composantes principales : 2

Règles, fuzzificateur, mécanisme d'inférence, et défuzzificateur :

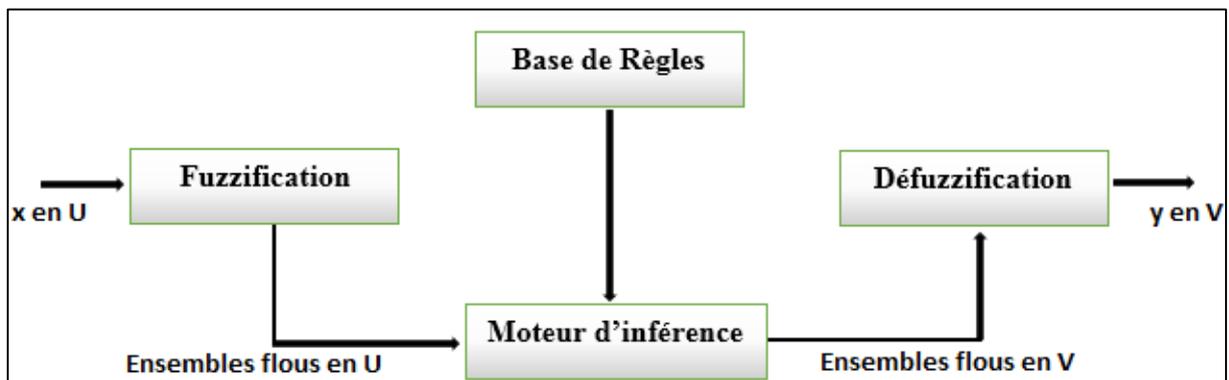


Fig (IV.1) : Représentation des systèmes flous.

IV.2. Opérateurs utilisés dans la logique floue

La liaison entre les variables linguistiques s'effectue au niveau des inférences par des opérations floues dont les plus utilisées [32] :

IV.2.1. Opérateur ET : réalisé en logique floue par la formation du minimum de la manière suivante :

$u_a(x)$ et $u_b(x)$ Sont deux fonctions d'appartenance liées par ET, ce qui est équivalent à

$$u_c(x) = \min(u_a(x), u_b(x))$$

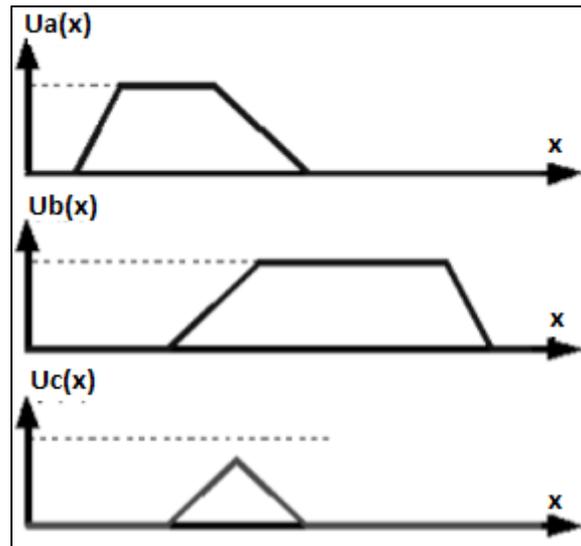


Figure (IV.2) : Opérateur ET

IV.2.2. Opérateur OU : cet opérateur est réalisé en logique floue par la formation du maximum de la manière suivantes : $u_a(x)$ ou $u_b(x)$ sont deux fonctions d'appartenance liées par OU, ce qui est équivalent

$$u_c(x) = \max(u_a(x), u_b(x))$$

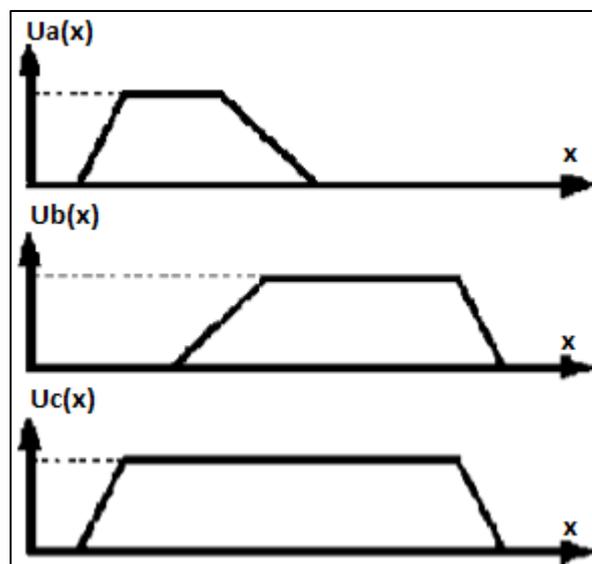


Figure (IV.3) : Opérateur OU

IV.2.3. Règles linguistiques

Les règles linguistiques dictent le fonctionnement des contrôleurs en reliant des conditions, à des actions sur le procédé. On remarque que la syntaxe est très proche du langage naturel, la forme représentation générale étant la suivante :

SI « la condition A est satisfaite » ALORS « la conséquence B résulte.

IV.2.4. Le concept d'un contrôleur flou

Le contrôle flou est l'étude de la mise au point et l'expérimentation des systèmes basés sur des règles exprimées par des catégories linguistiques telle que :

SI (x est A_1) ET (y est A_2) alors (u est B)

Où A_1 , A_2 et B sont des prédicats motionnés comme : positif, grand, nul, négatif.

IV.3.1. Fuzzification

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous.

Deux cas peuvent être envisagés selon le type de l'entrée qui peut être une valeur précise (singleton), ou un ensemble (qui représente l'incertitude sur l'entrée) [31].

IV.3.2. Base de règles d'un système flou

Les règles floues sont fournies par des experts, ou par extraction des données numériques.

Ces règles sont exprimées comme une collection d'instructions SI-ALORS sous la forme :

Si proposition antécédente Alors proposition conséquente

Dans la base de règles des systèmes flous, la relation entre les variables est représentée par des règles floues SI-ALORS. La proposition antécédente est toujours une proposition floue de type 'x est A' où x est la variable linguistique et A est le terme linguistique (prémisse).

La base de règles d'un système flou doit respecter certaines conditions afin d'assurer le bon fonctionnement de ce dernier. Parmi ces conditions on cite

- La complétude : une base de règles d'un système flou est dite complète si, pour chaque entrée, il existe au moins une règle floue activée. Afin d'assurer cette propriété, les fonctions d'appartenance doivent couvrir toutes les plages possibles des variables d'entrée.

- La consistance : une base de règles d'un système flou est dite inconsistante, s'il existe deux règles floues ayant la même prémisse mais des conclusions différentes. La propriété de consistance permet d'éviter les contradictions dans une base de règles

Exemple

Dans cet exemple les règles d'inférences sont décrites par une matrice d'inférence, qui les rassemble toutes sous forme de tableau (tableau.I.2). Dans notre cas le tableau est à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées (*T* et *V*). L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle. Il y a autant de cases que de règles.

Les règles que décrit ce tableau sont (sous forme symbolique)

SI (*T* est F **ET** *V* est F) **ALORS** *U* est Z

SI (*T* est M **ET** *V* est F) **ALORS** *U* est P

SI (*T* est E **ET** *V* est F) **ALORS** *U* est GP

SI (*T* est F **ET** *V* est E) **ALORS** *U* est Z

SI (*T* est M **ET** *V* est E) **ALORS** *U* est Z

SI (*T* est E **ET** *V* est E) **ALORS** *U* est P

U		T		
		F	M	E
V	F	Z	P	GP
	E	Z	Z	P

Tableau(IV.1) Matrice d'inférence.

Dans cet exemple, on a représenté les règles qui sont activées à un instant donné par des cases sombres :

SI (*T* est M **ET** *V* est F) **ALORS** *U* est P

SI (*T* est E **ET** *V* est F) **ALORS** *U* est GP

Il arrive que toutes les cases du tableau ne soient pas remplies, on parle alors de règles d'inférences incomplètes. Cela ne signifie pas que la sortie n'existe pas, mais plutôt que le degré d'appartenance, est nul pour la règle en question.

IV.3.2.1. Inférence floue

Les inférences lient les entrées et les variables de sortie par des règles linguistiques.

Chaque règle peut être vue comme une relation floue : $R : (X \times Y) \rightarrow [0, 1]$ calculée par [31] :

$$u_R(x, y) = I(u_A(x), u_B(y)) \quad \text{Eq (IV.1)}$$

I est un opérateur qui peut être, soit une implication floue ou une conjonction (t-norme). On note que $I(\dots)$ est calculé dans l'espace du produit cartésien $X \times Y$. Les opérateurs les plus courants sont de type conjonctif

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{l'implication de Mandani (1974)} u_R(x, y) = \text{Min}(u_A(x), u_B(y)) \\ \text{l'implication de Larsen (1980)} u_R(x, y) = u_A(x) \cdot u_B(y) \end{array} \right.$$

Le mécanisme d'inférence est basé sur le *modus ponens généralisé* qu'on l'appelle aussi le *raisonnement approximatif* :

$$\text{Règle 1 : SI } x \text{ est } A, \text{ Alors } y \text{ est } B \quad \text{Eq (IV.2)}$$

Où A et B présentent les propositions floues (ensemble).

Si on introduit un nouveau ensemble A' , et on considère la règle suivante :

$$\text{Règle 2 : SI } x \text{ est } A', \text{ ALORS } y \text{ est } B' \quad \text{Eq(IV.3)}$$

Est-ce que c'est possible de dériver le conséquent (B') de la règle 2, en utilisant l'information de la règle 1 ? La réponse est oui, par la procédure de la composition floue

$$B' = A \circ B \quad \text{Eq(IV.4)}$$

Pour le minimum (t-norme), la composition max-min est obtenue par :

$$u_{B'}(y) = \max_X \min_{XY} (u_{A'}(x), u_R(x, y)) \quad \text{Eq (IV.5)}$$

Si A' est un singleton x_0 , alors

$$u_{B'}(y) = \max_{x \in X} \min (u_{A'}(x), u_R(x, y)) = u_R(x_0, y) \quad \text{Eq (IV.6)}$$

Pour l'implication de Mamdani, on obtient

$$u_R(x, y) = \text{Min}(u_a(x), u_b(y)). \quad \text{Eq (IV.7)}$$

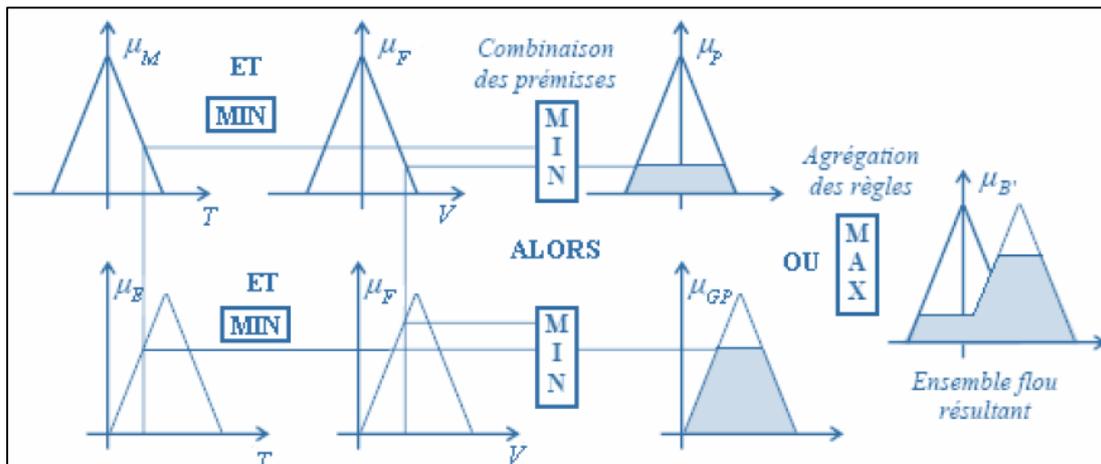
Comme on l'a déjà indiqué, il y a plusieurs méthodes d'inférence qui se différencient par la manière de réaliser les opérateurs utilisés dans les règles d'inférence. Les trois méthodes

d'inférence les plus usuelles sont : Max-Min, Max-Produit et Somme-Produit. Néanmoins, la méthode Max-Min est la plus utilisée à cause de sa simplicité.

IV.3.2.1.1.Méthode d'inférence Max-Min

Appelé aussi 'implication de Mamdani', elle réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max.

Reprenons l'exemple précédent où seulement deux règles sont activées



Fig(IV.4) Exemple d'inférence Max-Min.

IV.3.2.1.2.Méthode d'inférence Max-Produit

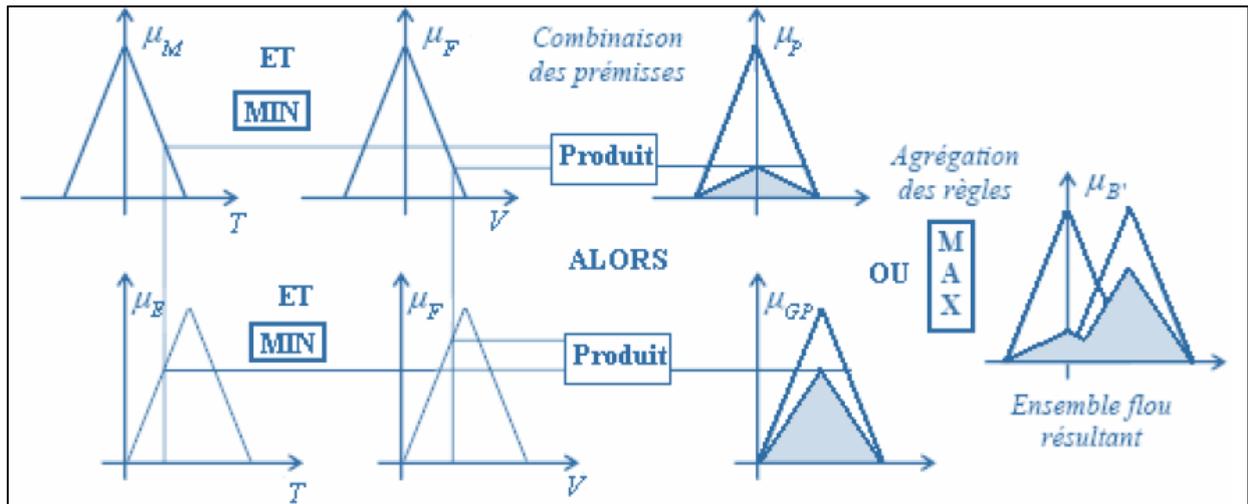
On l'appelle également "implication de Larsen". La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réaliser la conclusion "ALORS". Dans ce cas, on utilise le produit comme illustré par la fig.IV.5.

On remarque que les fonctions d'appartenances partielles ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur "ET".

IV.3.2.1.3.Méthode d'inférence Somme-Produit

Dans ce cas, l'opérateur "ET" est réalisé par le produit, de même que la conclusion "ALORS".

Cependant, l'opérateur "OU" est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence.



Fig(IV.5) Exemple d'inférence Max-Produit.

IV.3.3. Défuzzification

Le résultat du mécanisme d'inférence floue est un ensemble flou B' . Pour avoir une sortie numérique, B' doit être défuzzifié. Ce qui fait que la défuzzification est une transformation qui permet de remplacer un ensemble flou par une seule valeur numérique représentant cet ensemble. Plusieurs méthodes de défuzzification sont proposées dans la littérature [31].

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle du centre de gravité qui est donnée par :

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^F u_{B'}(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^F u_{B'}(y_j)} \tag{IV.8}$$

Où F est le nombre des éléments y_j dans Y (le domaine continu Y doit être discrétisé pour pouvoir calculer le centre de gravité).

La sortie est alors obtenue par défuzzification barycentrique par une autre forme :

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y} \left(\prod_{i=1}^n u_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(u_{F_i^l}(x_i) \right)} \tag{IV.9}$$

$x=[x_1, \dots, x_n]^T$ est l'entrée du système flou ;

\bar{y} : est l'abscisse où la fonction $u_{G^1}(y)$ atteint son maximum. en écrivant la relation (1) sous une forme plus compacte, on obtient [33] :

$$y(x) = \theta^T \xi(x) \tag{IV.10}$$

Où ;

$\theta = [\bar{y}, \dots, \bar{y}^l]^T$ Est un vecteur de paramètres ; $\xi(x) = [\xi^1(x), \dots, \xi^l(x)]^T$ sont les fonctions floues de base dont l'élément $\xi^1(x)$ est défini par :

$$\xi^1(x) = \frac{\prod_{i=1}^n u_{F_i^1}(x_i)}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{i=1}^n u_{F_i^1}(x_i) \right)} \tag{IV.11}$$

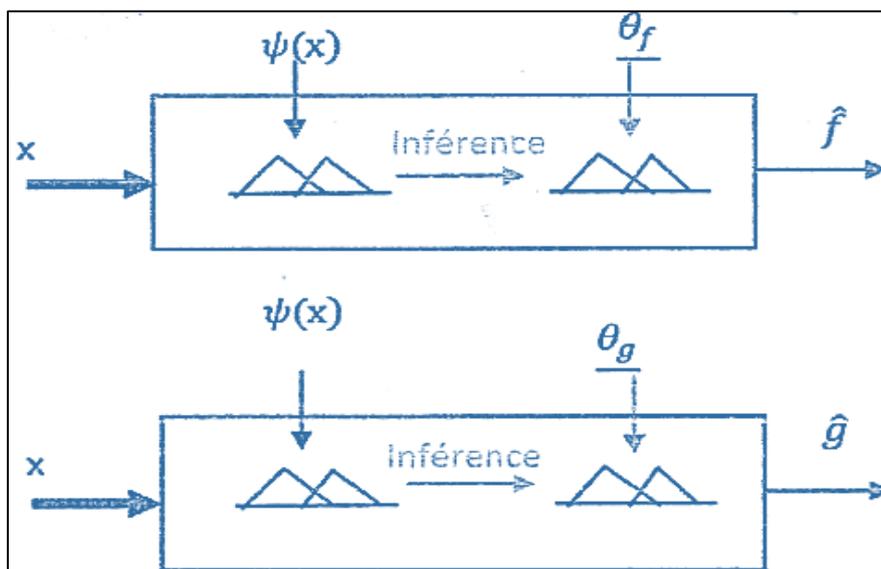
Avec la loi d'adaptation pour les paramètres

$$\dot{\theta}_f = -y_1 e^T P B \psi(x) \tag{IV.12}$$

$$\dot{\theta}_g = -y_2 e^T P B \psi(x) u \tag{IV.13}$$

En utilisant sigleton fuzzification, moyenne de fuzzification et inférence de produit, nous pouvons obtenir systèmes flous $\hat{f}(x/\theta_f)$ et $\hat{g}(x/\theta_g)$ sous la forme :

$$\hat{f}(x/\theta_f) = \theta_f^T \psi(x) \quad \hat{g}(x/\theta_g) = \theta_g^T \psi(x) \tag{IV.14}$$



Fig(IV.6) : Approximation des Fonction par un Système Flou

Si f et g sont inconnues, on les approxime par les systèmes flous, $\hat{f}(x/\theta_f)$ et $\hat{g}(x/\theta_g)$

$$u_c = \frac{1}{\hat{g}(x/\theta_g)} [-\hat{f}(x/\theta_f) + y_m^{(n)} + K^T e - u_a] \tag{IV.15}$$

$$u_a = -\frac{1}{r} B^T p e \tag{IV.16}$$

Il a été démontré que les systèmes flous, utilisant le singleton fuzzifier, le produit d'inférence, et la défuzzification par centre de gravité, sont capables d'approximer n'importe quelle fonction réelle continue dans un ensemble compact avec une précision arbitraire donnée [20], [34].

La base règles flous est construite par une collection de règles linguistiques de la forme :

$$R^{(l)}: IF x_1 is F_1^l and x_2 is F_2^l \dots and x_n is F_n^l THEN y is G^l; l = 1, \dots, M,$$

M étant le nombre de règles.

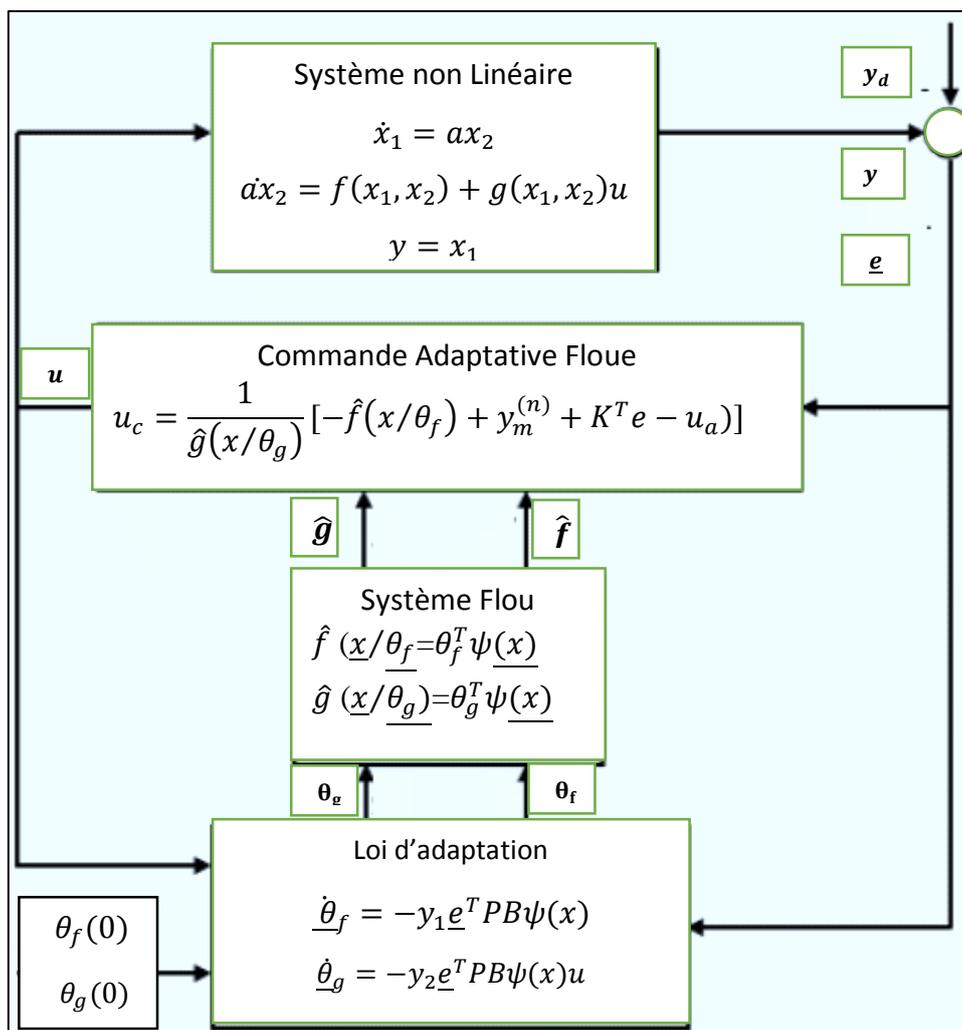


Figure (IV.7) : Schéma général d'un stabilisateur indirect adaptatif flou [35]

IV.4.Simulation : avec l'axe des (x) représente le Temps en (s)

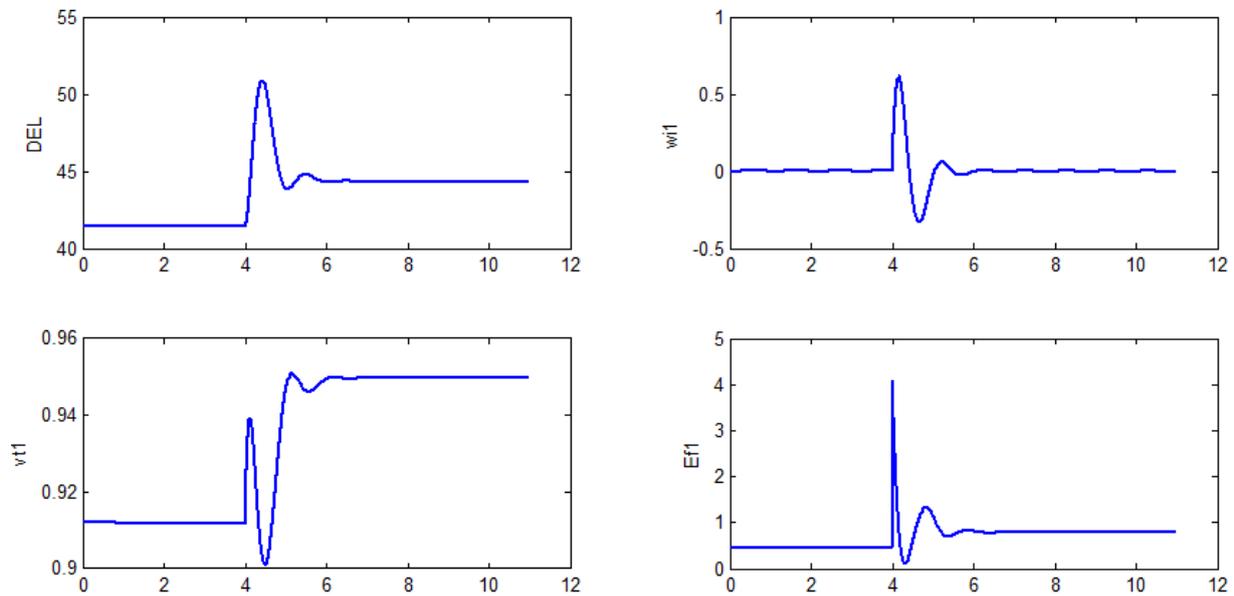


Figure (IV.8) Réseau Electrique à une machine avec accroissement brutal de 20% de la puissance mécanique après l'application de la commande.

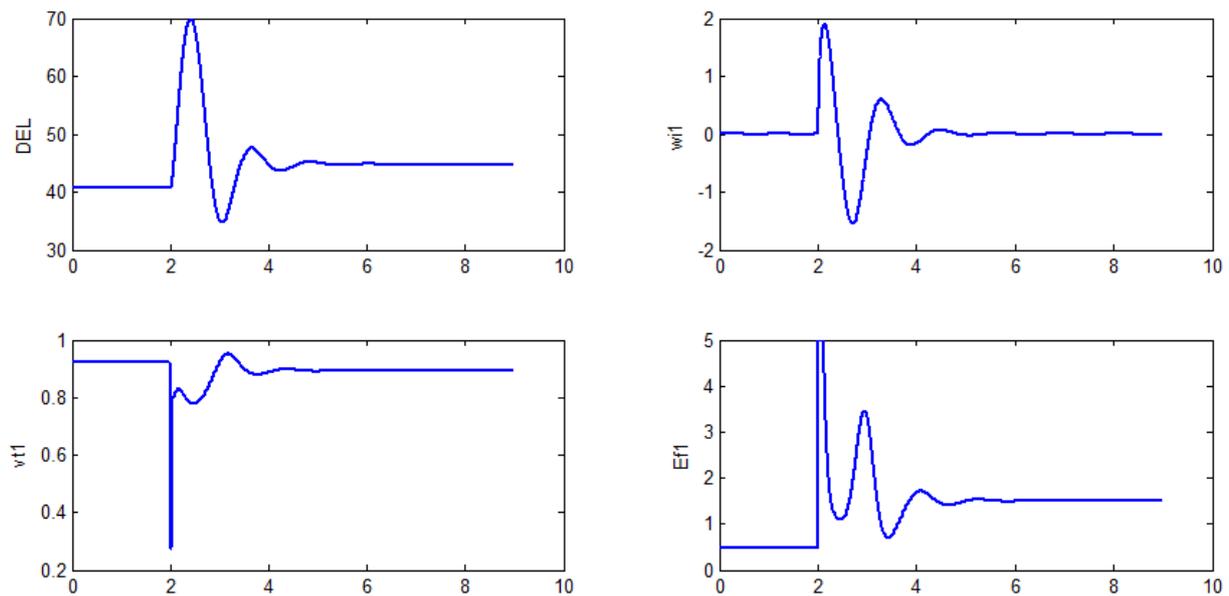


Figure (IV.9) Réponse du système à une machine avec court-circuit triphasé après l'application de la commande.

IV.4.1.Résultat de Simulation

Les figures (IV.8) (IV.9) montre les résultats de simulation, On remarque que les trajectoires de notre système convergent vers les trajectoires désirées, l'erreur entre le modèle et le système converge à zéro.

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

IV.5.Conclusion :

La commande adaptative indirecte décentralisée a été développée pour une classe de systèmes non linéaires interconnectés en utilisant les systèmes flous. Cette approche repose sur l'identification en ligne des non linéarités locales de chaque sous-système par des systèmes flous. La loi de commande contient une loi de commande adaptative floue au quelle se superpose une composante de robustification. Cette dernière est introduite pour assurer la stabilité et la robustesse de la structure de commande par rapport aux erreurs d'approximation et aux effets des interconnexions entre les sous-systèmes.

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

D'une manière générale, l'analyse et la commande des systèmes non linéaires sont des problèmes difficiles et la majorité des approches de la commande non linéaires exigent la disponibilité d'un modèle mathématique. Cette commande doit être robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations.

Dans ce travail, l'objectif de commande est la résolution d'un problème de suivre de trajectoire, alors forcer le système non linéaire à suivre une trajectoire de référence donnée, tout en assurant la convergence de l'erreur vers zéro, et garantir la bornitude de tous les signaux de la boucle fermée.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif de synthétiser une loi de commande adaptative floue indirecte, pour une classe des systèmes non linéaires, les lois d'adaptation sont tirées de l'étude de la stabilité d'un réseau électrique multi- machines en régime transitoire.

Après avoir donné un bref aperçu sur le réseau électrique en premier chapitre, la modélisation de ce dernier est une étape primordiale pour commander le modèle non linéaire du réseau comportant n générateur en vue d'étudier sa stabilité transitoire c'est l'objet de deuxième chapitre. Afin de valider le modèle ainsi obtenu des tests simulations on été effectués. Un accroissement brutal de la puissance mécanique a été également simulé.

Avant d'entamer l'application de la commande adaptative floue indirecte, et dont le but de mieux comprendre l'apport et l'utilité de cette technique, Nous avons présentés les notions de bases de cette commande en premier lieu, une approche de commande est proposée pour la commande des systèmes mono-variables. Un seul système flou est utilisé pour approcher en ligne la dynamique inconnue du système. A partir de cette approximation, une loi de commande adaptative floue, avec la loi d'adaptation paramétrique est proposée. Le problème des erreurs de reconstruction, inhérent à ce type de stratégies de commande,

La stabilité et la robustesse du système en boucle fermé est assurée par la synthèse de Lyapunov au sens que tous les signaux soient bornés tandis que les paramètres du contrôleur sont ajustés en ligne via les lois d'adaptation développées.

Enfin, on peut dire que le contrôle adaptatif flou est une méthode moderne et efficace pour améliorer les performances des systèmes non linéaires et assurer la stabilité globale de ce système.



Bibliographie

Bibliographie

[1] : **Mme Belhadj Lilia**, thèse de doctorat Intitulé Commande neuro-flou d'un réseau multi machine.

[2] : **Othmane ELAlaoui Jamal**, «application a la logique floue» mémoire online, EMSI - Ingénieur en Automatismes et Informatique Industrielle 2010.

[3] **hadi saadat**, Power Systems Analysis – 1998, Edition Har/Dsk Su.

[4] **A. Doulet**. Réseaux de distribution d'électricité - présentation. Techniques de l'ingénieur : Réseaux électriques et applications, Cahier D(4200), Mai 2010.

[5] **Wendy Carolina Briceno Vicente**. Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes. Energie électrique. Université de Grenoble, 2012. Français. <tel-00736141>

[6] **Christophe et al**, Février 1997, Guide de conception des réseaux électriques industriels , DAS Transport et Distribution Activité Ensembles et Applications, n° : 6 883 427/A

[7] **THESE NICOLAS LÉCHEVIN**, AVRIL 2000, APPROCHE DE PASSIVITÉ POUR LA STABILISATION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

[8] **Liva Falisoa Rafanotsimiva**. Étude de commandes non linéaires pour réseaux électriques – Application à un système SMIB. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Antsiranana, 2013. Français. <tel-01005136

[9] **Seyed Mohammad SADEGHZADEH** ,these Doctorat , 1998 ,Améloiration de la stabilité Transitoire et de L'amortissement des Oscillation d'un Reseau Electrique a l'aide de SMES et de SSSC,Université de la Technologie Téhéran, Iran.

[10] **Diego LANGARICA CORDOBA**, These de doctorat , 2014, Stabilisation Transitoire de Systèmes de Puissance: une approche unifiée. ÉCOLE DOCTORALE Sciences et Technologie de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes Laboratoire des Signaux et Systèmes

[11] **NAAMA BAKHTA**, Mémoire Master ,2017, LA PRODUCTION DECENTRALISEE, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf.

[12] **BOURENANE Med Adnane**, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2017, Amélioration de la stabilité Transitoire d'un réseau électrique New England par systems FACTS et Application sur le réseau Hassi Berkine.

[13] **BERRADA Youssef** ,2013,Commande décentralisée par mode glissant et réseaux de neurones pour les réseaux électriques multi-machines

[14] **wildi** , 4eme Edition , Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2005/0074/151

[15] **P.M.Anderson** ,Power SystemControl and stability,Second Edition, 2003,IEEE Press.

[16] **Melahic Ahmed**, Commande Décentralisée par logique floue des processus complexe Application au réseau électrique, thèse de Magister ENP 2001.

[17] **Thierry VAN CUTSEM** ,2017, Notes théoriques du cours ELEC0029, *Electric Power System Analysis*, La machine synchrone

[18] **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.

[19] **Abdenmour DISSAet al**,Commande adaptative de la machine synchrone à aimant permanent, Department de Génie Electrique Université de Batna, Algeria, article The 2nd International Conference on Electronics and Oil: From Theory to Applications (ICEO'13)

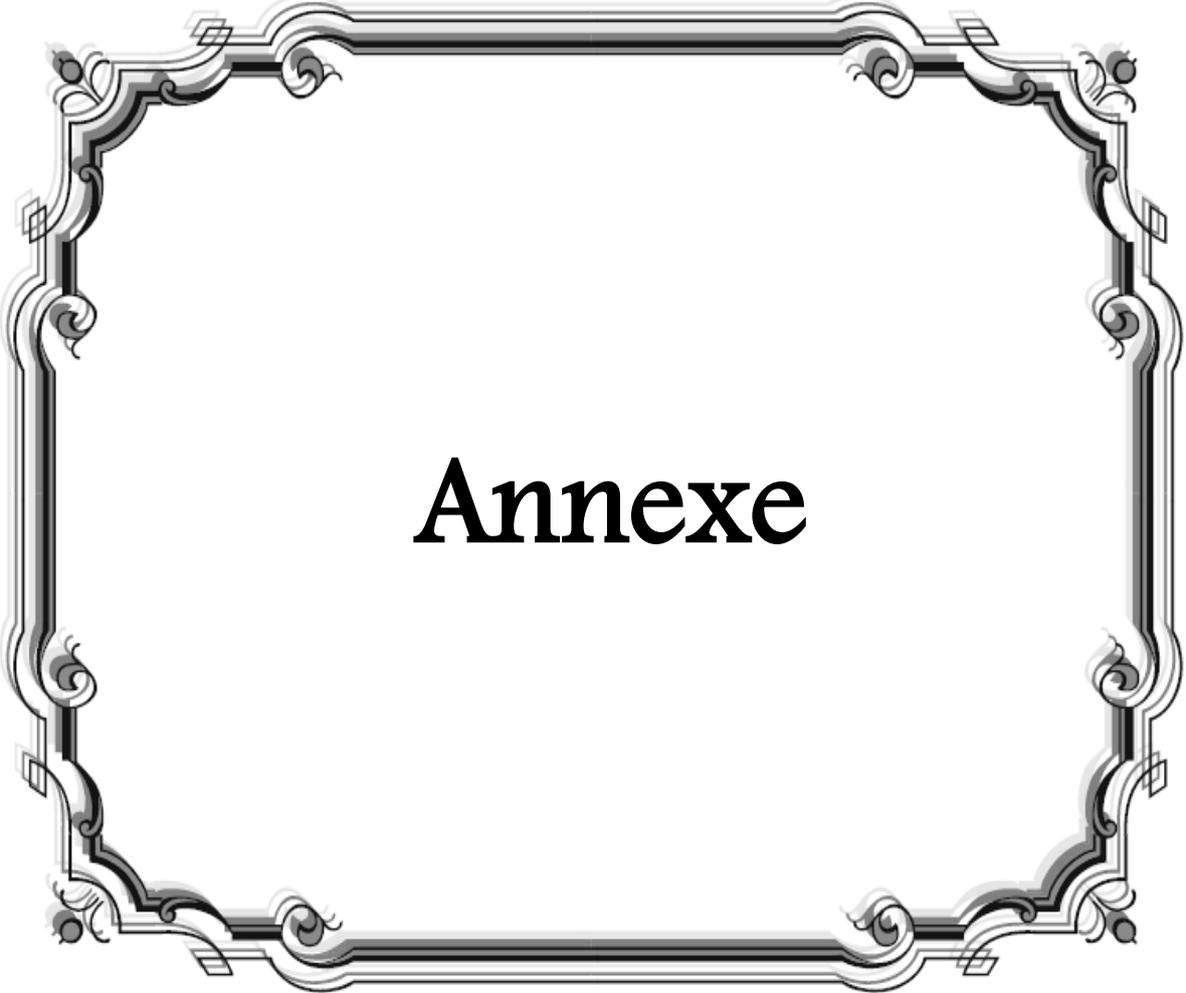
[20] **Dr,H.Merabet Boulouiha** (Technique de commande avancée) centre universitaire de Relizane Ahmed Zabana Faculté Des Sciences et de la Technologie ST Département d'Electrotechnique ,2014

[21] **Rogelio Lozano** , Damia Touataou (Identification et commande adaptative) ED, Ellipse ,2001.

[22] **P.C.Parks**, «Lyapunov redesign of model reference adaptive control», IEEE trans, on A.C, vol.11, pp 362-367

[23] **Zerari Nassira** , These Magister, 2014, la commande adaptative des systemes non Linéaire Approche Basé sur la stabilité de Lyapunov , Université de Constantine.

- [24] **S.S.Ge, T.H. Lee , and j.wang,**(Adaptive control of non – affine nonlinear systems using neural networks),in Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC 2000),pp 13-18, Rio , Patras , Greece,2000.
- [25] **J,E Slotine and W. Li,** Applied nonlinéaire control, Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ,1991.
- [26] **Isidori.A**<< NonLinear Control Systems>>, 2nd,Springer-Verleg, Berlin,1989.
- [27] **R.Karimi,M.B.Menhadj, M.Karimi-Ghartemani, and I.Sabbori,**'Decentraliezd adaptive Control of large-Locale Affine and Non-Affine NonLinear systems',IEEE Transaction on Instrumentation and Measurment, Vol.58.2009
- [28] **Park,J.H, and Kim, S.H,**'Direct Adaptive Output Feedback Fuzzy Controller for Non-Affine NonLinear System', Proc, of IEEE, Control Theory Applications, Vol.9,1998.
- [29] **S.S. Ge, Hang, C.C. and Zhang T,**' NonLinear Adaptive Control Using Neural Networks and its Applications to CSTR systems', Journal Of Process Control Vol.9,1998.
- [31] **MOKADDEM Sana** ,2008, Mémoire de Magister, Commande adaptative floue de type-2 pour des systèmes non linéaires incertains.
- [32] **BENCHIKH Abdelfattah** ,2017, Mémoire Master , COMMANDE ADAPTATIVE FLOUE ROBUSTE BASEE SUR UN OBSERVATEUR FLOU POUR SYSTEME NON LINIARES INCERTAINS (SNLI) VIA BACKSTEPPING
- [33] **Shaocheng Tonga,Han-Xiong Lib, Wei Wangc,**(Observer-based adaptive fuzzy control for SISO nonlinear systems) Research of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024 ,PR China Received 29 June 2002 ; received in revised form 8 September 2003 ;accepted 12 November 2003.
- [34] **S.S.Ge, T.H. Lee , and j.wang,**(Adaptive control of non – affine nonlinear systems using neural networks),in Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC 2000),pp 13-18, Rio , Patras , Greece,2000.
- [35] **Kamel SAOUDI**,2014, these Doctorat en Science en Electrotechnique,Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF1 UFAS (ALGERIE)

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of each side. The frame is rendered in black and white with a slight 3D effect.

Annexe

ANNEXE : paramètre de réseau étudié

Paramètre de charge

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

Paramètres de la machine

x_d	1.68 (pu)
x'_d	0.32 (pu)
T'_{d0}	4 (pu)
H	2.31 (s)
D	0

Points de fonctionnements

δ	37.93 deg
P_m	0.8005 pu
E_f	0.3770 pu
V_t	0.9999 pu
E'_q	0.8430 pu
I_q	0.9497 pu
I_a	-0.3426 pu

Calcul de la matrice admittance

Le défaut considéré ici est un court-circuit triphasé survenant à la ligne de transmission qui lie le nœud (G) 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 :

$$Bad [0.2137 \quad 0.1134]$$

$$Gad [1.1909 \quad 0.9830]$$