

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Ing.

PAR
TARIK ZABAIYOU

COMPENSATION DES DÉLAIS DE COMMUNICATION D'UNE COMMANDE
GLOBALE DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

MONTRÉAL, LE 13 DÉCEMBRE 2005

(c) droits réservés de Tarik Zabaïou

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis-A Dessaint, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Aimé Francis Okou, codirecteur de mémoire
Département de génie électrique et informatique au collège militaire royal du Canada

Mme. Ouassima Akhrif, présidente du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Robert Grondin, membre externe
Institut de recherche d'Hydro-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 28 NOVEMBRE 2005
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMPENSATION DES DÉLAIS DE COMMUNICATION D'UNE COMMANDE GLOBALE DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Tarik Zabaïou

RÉSUMÉ

Les délais de mesure et de communication ne sont pas souvent pris en considération lors de la conception des contrôleurs basée sur les mesures à la grandeur du réseau électrique (communément appelé commande globale). À cause de la taille du réseau électrique due au fait que ses constituants sont très éloignés les uns des autres, ces délais peuvent considérablement affecter la stabilité du système. Le présent travail de recherche propose une méthode basée sur le principe du prédicteur de Smith pour compenser les délais de mesure et de communication d'une commande globale de réseaux électriques.

Pour atteindre cet objectif, nous commençons par introduire la version linéaire de la commande globale [7] qui consiste en une structure hiérarchisée à deux niveaux. Les régulateurs conventionnels (régulateur automatique de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur de puissance) au premier niveau et un régulateur global (central) au deuxième niveau. Cette structure nécessite l'utilisation de l'approche multi générateurs qui intègre toutes les interactions dynamiques pour modéliser le réseau électrique. Le modèle obtenu est ensuite mis sous une forme plus appropriée pour appliquer la commande hiérarchisée. Cette dernière a permis d'améliorer la performance des régulateurs locaux et d'amortir les oscillations inter zones en présence de grandes perturbations. Des résultats satisfaisants ont été obtenus quand les délais sont négligeables.

L'existence des délais de mesure entre les générateurs du réseau et le régulateur global d'une part, et les délais de communication (commande) entre le régulateur global et les régulateurs locaux d'autre part, affecte de façon considérable la performance de la commande hiérarchisée. L'application du prédicteur de Smith permet de conserver cette performance en présence des délais. Pour ce faire, nous introduisons le principe du prédicteur de Smith pour un système monovarié avec délai simple. Puis nous appliquons ce prédicteur à un système multivariable linéaire avec délai de mesure et de commande. Enfin l'adaptation et la validation de cette méthode de prédiction sur un réseau électrique multimachine en présence du contrôleur global et des délais. Les résultats obtenus attestent l'efficacité et la validité de cette méthode face à des délais de mesure et de communication différents.

COMPENSATION DES DÉLAIS DE COMMUNICATION D'UNE COMMANDE GLOBALE DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Tarik Zabaiou

SOMMAIRE

Les délais de mesure et de communication ne sont pas souvent pris en considération lors de la conception des contrôleurs basée sur les mesures à la grandeur du réseau électrique (communément appelé commande globale). À cause de la taille du réseau électrique due au fait que ses constituants sont très éloignés les uns des autres, ces délais peuvent considérablement affecter la stabilité du système. Le présent travail de recherche propose une méthode basée sur le principe du prédicteur de Smith pour compenser les délais de mesure et de communication d'une commande globale de réseaux électriques.

Pour atteindre cet objectif, nous commençons par introduire la version linéaire de la commande globale [7] qui consiste en une structure hiérarchisée à deux niveaux. Les régulateurs conventionnels (régulateur automatique de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur de puissance) au premier niveau et un régulateur global (central) au deuxième niveau. Cette structure nécessite l'utilisation de l'approche multi générateurs qui intègre toutes les interactions dynamiques pour modéliser le réseau électrique. Le modèle obtenu est ensuite mis sous une forme plus appropriée pour appliquer la commande hiérarchisée. Cette dernière a permis d'améliorer la performance des régulateurs locaux et d'amortir les oscillations inter zones en présence de grandes perturbations. Des résultats satisfaisants ont été obtenus quand les délais sont négligeables.

L'existence des délais de mesure entre les générateurs du réseau et le régulateur global d'une part, et les délais de communication (commande) entre le régulateur global et les régulateurs locaux d'autre part, affecte de façon considérable la performance de la commande hiérarchisée. L'application du prédicteur de Smith permet de conserver cette performance en présence des délais. Pour ce faire, nous introduisons le principe du prédicteur de Smith pour un système monovarié avec délai simple. Puis nous appliquons ce prédicteur à un système multivariable linéaire avec délai de mesure et de commande. Enfin l'adaptation et la validation de cette méthode de prédiction sur un réseau électrique multimachine en présence du contrôleur global et des délais. Les résultats obtenus attestent l'efficacité et la validité de cette méthode face à des délais de mesure et de communication différents.

COMPENSATION OF COMMUNICATION TIME DELAYS IN WIDE AREA MEASUREMENTS BASED POWER SYSTEMS CONTROL

Tarik Zabaoui

ABSTRACT

The impact of time delay has been very often neglected in power systems control using wide area signals. However, for large interconnected systems, communication and remote measurements delays may be significant and therefore reduce controller's performance. This research proposes a method based on the Smith prediction approach to compensate time delays in wide area measurements based control.

First, a linear version of the hierarchical controller proposed in [7] is introduced. The solution requires the reformulation of traditional multimachine power systems model into a new one, and leads to a two-level structure with local controllers (AVR, Speed governor and PSS) at the first level helped by a central one at the secondary level. The centralized controller is used to improve the stability and dampen inter-area oscillations by explicitly compensating the interactions among generators. Simulation results reveal that, when the delays are negligible, the central controller considerably enhances local controller's performance, and may even prevent system instability in case of severe contingencies.

However, in presence of large measurement delays between generators and the central controller and communication delays between local and central controllers, the performance of the latter is considerably affected. To recover the delay-free performances, prediction based on Smith approach is proposed. First, the classical Smith predictor for monovisible systems is introduced and secondly, extended to the multivariable case with time delays both in the inputs and outputs signals. Finally the adaptation and validation of the new hierarchical controller is performed on a realistic power system and in presence of large time delays. The simulation results attest that our compensation technique preserves the hierarchical controller's performance.

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche décrit dans ce rapport a été effectué au sein du Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et en Commande Industrielle (G.R.E.P.C.I) dans le cadre des travaux de recherche récents sur la compensation des délais dans une commande globale de réseaux électriques. Ainsi, mes premiers remerciements et ma gratitude vont à mon directeur de recherche M. Louis-A. Dessaint, pour son encadrement exceptionnel, ses conseils précieux, ses encouragements et pour m'avoir proposé ce sujet qui m'a permis d'acquérir de nouvelles connaissances.

Je tiens aussi à remercier profondément mon co-directeur de recherche M. Francis-A. Okou, pour sa disponibilité sans limite, son encadrement et ses critiques constructives le long de mes travaux.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les étudiants du (G.R.E.P.C.I) et à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'avancement de mon projet de maîtrise. Enfin, je remercie tous les membres de ma famille pour leur amour et leur soutien. Leurs encouragements ont été mes motivations tout le long de mes études.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Modèle du générateur.....	6
1.2.1 Modèle à deux axes d'une machine synchrone.....	6
1.2.2 Modèle de l'excitatrice.....	7
1.2.3 Modèle de la turbine.....	8
1.3 Modélisation de l'interconnexion du réseau électrique	10
1.3.1 Référentiel absolu.....	11
1.3.2 Exemple de modélisation de l'interconnexion d'un réseau électrique....	12
CHAPITRE 2 INTRODUCTION AUX RÉGULATEURS CONVENTIONNELS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 Régulateur automatique de tension	15
2.3 Régulateur de vitesse.....	17
2.4 Stabilisateur de puissance	19
CHAPITRE 3 LE CONTRÔLEUR GLOBAL LINÉAIRE	22
3.1 Introduction.....	22
3.2 Nouveau modèle global du réseau électrique.....	23
3.2.1 Rappel sur la linéarisation autour du point de fonctionnement.....	26
3.2.2 Le modèle global linéaire.....	27
3.3 Validation du modèle du réseau électrique par observateur	33
3.4 Conception du contrôleur global linéaire	38
3.4.1 Définition de la commande globale	38
3.4.2 Équations du contrôleur global sans délai.....	42

CHAPITRE 4	TESTS DE VALIDATION DU CONTRÔLEUR GLOBAL	48
4.1	Description du réseau test	48
4.2	Tests de simulation.....	49
4.2.1	Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1	49
4.2.2	Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1 et ouverture de la ligne L1.....	55
4.2.3	Défaut triphasé de quatre cycles sur la ligne L1	57
4.2.4	Défaut triphasé de cinq cycles sur la ligne L1	58
4.2.5	Défaut triphasé de cinq cycles à la barre B1 et ouverture des lignes L1 et L2	59
4.2.6	Les oscillations inter zones	60
4.3	Conclusion	62
4.4	Effets du délai sur la performance du contrôleur global	62
CHAPITRE 5	COMPENSATION DES DÉLAIS PAR LE PRÉDICTEUR DE SMITH	65
5.1	Introduction.....	65
5.2	Rappel sur le prédicteur de Smith.....	66
5.3	Équations du contrôleur global avec délai	68
5.4	Application du prédicteur de Smith	73
5.5	Tests de simulation.....	75
5.5.1	Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1	76
5.5.2	Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1 et ouverture de la ligne L1.....	81
5.5.3	Défaut triphasé de cinq cycles sur la ligne L1	82
5.5.4	Les oscillations inter zones	83
5.6	Conclusion	83
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	85
ANNEXES		
1	: Linéarisation du modèle global	87
2	: Les paramètres du modèle du réseau électrique.....	105
3	: Paramètres du réseau test et données de simulation.....	112
4	: Estimation des paramètres du contrôleur	116
BIBLIOGRAPHIE	124
Tableau I	Délais associés aux différents moyens de communication.....	41

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	Composants du générateur	6
Figure 2	les repères absolu et local.....	12
Figure 3	Exemple de réseau simple de 3 barres	12
Figure 4	Principe de la régulation de tension	16
Figure 5	Système d'excitation de type DC1A de IEEE.....	16
Figure 6	Principe de la régulation de vitesse	17
Figure 7	Régulateur de vitesse de type PID	18
Figure 8	Schéma bloc du servomoteur	18
Figure 9	Système d'excitation de type DC1A de IEEE avec PSS.....	19
Figure 10	Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS1A.....	20
Figure 11	Stabilisateur multi-bandes de type IEEE PSS4B	20
Figure 12	Observateur du réseau électrique	34
Figure 13	Le réseau test multi générateurs	35
Figure 14	La variable d'état η_i réelle.....	36
Figure 15	La variable d'état $\hat{\eta}_i$ estimée	36
Figure 16	L'erreur (e) entre η_i réelle et $\hat{\eta}_i$ estimée	36
Figure 17	La variable d'état z_i réelle.....	37
Figure 18	La variable d'état \hat{z}_i estimée	37
Figure 19	L'erreur (e) entre z_i réelle et \hat{z}_i estimée	37
Figure 20	Structure de la commande hiérarchisée.....	39
Figure 21	Exemple d'utilisation d'un PMU dans un réseau électrique.....	40
Figure 22	Contrôleur local avec signaux du contrôleur global	43
Figure 23	Réseau électrique multi générateurs.....	49
Figure 24	Excitation de G1 après un court-circuit à la barre B1	50

Figure 25	Excitation de G4 après un court-circuit à la barre B1	50
Figure 26	Puissance mécanique de G2 après un court-circuit à la barre B1	51
Figure 27	Vannage de G2 après un court-circuit à la barre B1	51
Figure 28	Angle de charge de G1 après un court-circuit à la barre B1	52
Figure 29	Angle de charge de G4 après un court-circuit à la barre B1	52
Figure 30	Vitesse de G1 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1	53
Figure 31	Tension de G1 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1	53
Figure 32	Vitesse de G4 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1	54
Figure 33	Tension de G4 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1	54
Figure 34	Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1	55
Figure 35	Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1	55
Figure 36	Vitesse de G4 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1	56
Figure 37	Tension de G4 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1	56
Figure 38	Vitesse de G1 après un court-circuit de 4 cycles sur la ligne L1	57
Figure 39	Tension de G1 après un court-circuit de 4 cycles sur la ligne L1	57
Figure 40	Vitesse de G1 après un court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1	58
Figure 41	Tension de G1 après un court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1	58
Figure 42	Vitesse de G1 court-circuit de 5 cycles et ouverture de deux lignes	59
Figure 43	Tension de G1 court-circuit de 5 cycles et ouverture de deux lignes	59
Figure 44	Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles à la barre B1	60
Figure 45	Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles et ouverture de L1	61
Figure 46	Oscillations interzones court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1	61
Figure 47	Vitesse de G1 après un court-circuit avec différents délais	63
Figure 48	Tension de G1 après un court-circuit avec différents délais	63
Figure 49	Boucle de régulation conventionnelle avec délai	66
Figure 50	Boucle de régulation conventionnelle avec délai isolé	66
Figure 51	Principe du prédicteur de Smith	67
Figure 52	Existence des délais dans la commande globale	68
Figure 53	Application de la prédiction pour compenser les délais	73

Figure 54	Prédicteur de Smith avec les délais de mesure et de commande	74
Figure 55	Réseau test.....	76
Figure 56	Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 200ms	77
Figure 57	Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 200ms	77
Figure 58	Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 400ms	78
Figure 59	Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 400ms	78
Figure 60	Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 300ms	79
Figure 61	Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 300ms	79
Figure 62	Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 350ms	80
Figure 63	Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 350ms	80
Figure 64	Vitesse de G1 court-circuit avec ligne ouverte et délai de 400ms	81
Figure 65	Tension de G1 court-circuit avec ligne ouverte et délai de 400ms	81
Figure 66	Vitesse de G1 court-circuit de cinq cycles sur L1 et délai de 400ms	82
Figure 67	Tension de G1 court-circuit de cinq cycles sur L1 et délai de 400ms ...	82
Figure 68	Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles et délai de 400ms.....	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

A_t	Le gain de la turbine hydraulique
α_{1i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
α_{2i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
AVR	Le régulateur automatique de tension
β_{1i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
β_{2i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
B'_{ik}	La composante imaginaire de la matrice d'admittance
δ	L'angle de charge du générateur
δ_k	L'angle de charge dans le référentiel absolu
DC1A	Système d'excitation à courant alternatif
D_{ci}	Délai de communication
D_{mi}	Délai de mesure
EDF	Électricité de France
E'_d	La composante de l'axe d de la tension interne transitoire
E_{fd}	La tension de champ
E'_q	La composante de l'axe q de la tension interne transitoire
g	L'ouverture du vannage de la turbine
G'_{ik}	La composante réelle de la matrice d'admittance
H	La constante d'inertie du rotor
PSS	Le stabilisateur de puissance du réseau électrique
I	Le courant au stator
i_d	La composante de l'axe d du courant du stator
i_q	La composante de l'axe q du courant du stator

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
K_a	Le gain du servomoteur
K_p	Le gain proportionnel
K_d	Le gain dérivé
K_i	Le gain intégral
K_{HPi}	La fraction de la puissance totale fournie par la haute pression HP
K_{ni}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme local-
K_{nik}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme global-
η_i	La nouvelle variable d'état du modèle linéaire
P_m	La puissance mécanique fournie par une turbine hydraulique
P_{SVi}	La position de la vanne de la turbine thermique
P_{CHi}	La pression de la vapeur
ρ_{1i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
ρ_{2i}	Paramètre du modèle non linéaire du réseau électrique
q	Le débit d'eau de la turbine hydraulique
R_S	La résistance des enroulements du stator
R_{ni}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme local-
R_{nik}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme global-
t	Constante du temps
T_{CHi}	La constante de temps de la vapeur
T_d	Constante du temps dérivé
T'_{do}	La constante de temps transitoire en circuit ouvert de l'axe d
T_g	La constante de temps équivalente du servomoteur réduit à un premier ordre
T_i	Constante du temps intégrale
T_{Mi}	Le couple mécanique de la turbine thermique

T_{ni}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme local-
T_{nik}	Paramètre du modèle linéaire du réseau électrique -terme global-
T'_{qo}	La constante de temps transitoire en circuit ouvert de l'axe q
T_{RHi}	La constante de temps du refroidisseur
T_W	Le temps d'établissement du débit nominal
V_d	La composante de l'axe d de la tension terminale du générateur
V_q	La composante de l'axe q de la tension terminale du générateur
V_{Stab}	La tension du stabilisateur de puissance
V_t	La tension terminale du générateur
w	La vitesse de rotation du rotor
w_{ik}	La vitesse relative $w_k - w_i$
w_S	La vitesse de rotation synchrone du générateur
X_d	La réactance synchrone dans l'axe d
X_q	La réactance synchrone dans l'axe q
X'_d	La réactance transitoire dans l'axe d
X'_q	La réactance transitoire dans l'axe q
Z_i	La nouvelle variable d'état du modèle linéaire

INTRODUCTION

Durant la dernière décennie, la commande des réseaux électriques a connu un grand essor et une implication considérable de la part des chercheurs. Beaucoup d'efforts ont été consacrés pour développer de nouvelles stratégies de contrôle qui garantissent une meilleure stabilité. Le réseau électrique est un système complexe, multivariable et non linéaire. Sa stabilité est assurée entre autres par les régulateurs conventionnels qui sont le régulateur automatique de tension et le régulateur de vitesse aidés par un stabilisateur de puissance (PSS) qui amortit les oscillations locales et inter zones. Toutefois, la combinaison non coordonnée de cet ensemble de régulateurs ne permet pas toujours d'assurer la stabilité du réseau électrique particulièrement lors de grandes perturbations. Plusieurs travaux de recherche ont alors été effectués pour accroître la coordination et la performance de cet ensemble de régulateurs par l'application des nouvelles méthodes de commande qui tiendront compte de la complexité et la grandeur du réseau électrique. Ces stratégies se nourrissent d'une nouvelle vision de commande basée sur les approches décentralisées et hiérarchisées. Les plus importantes de ces nouvelles études Kamwa [11] propose une structure hiérarchisée qui consiste en des PSS centraux qui travaillent en coordination avec les PSS locaux. Okou [6] utilise une nouvelle approche décentralisée pour la commande de la vitesse et la tension d'un réseau multimachine. Ni Hui [8] a introduit l'approche multi agents et Aboul-Ela [9] utilise une coordination des stabilisateurs (PSS) et des compensateurs statiques (SVC) basée sur des signaux globaux. Brucoli [12] propose une commande décentralisée de l'excitation à deux niveaux et enfin l'approche globale basée sur les mesures à la grandeur du réseau est introduite dans Okou [7]. Toute notre étude est principalement basée sur l'approche globale qui est une structure hiérarchisée à deux niveaux. Composée des régulateurs locaux (conventionnels) au premier niveau et un régulateur central (global) au deuxième niveau, cette structure a prouvé son efficacité. Elle a permis l'amélioration de la performance des régulateurs conventionnels et l'amortissement des oscillations locales

et inter zones. De très bons résultats ont été obtenus quand les délais de communication inter régulateurs et les délais de mesure entre les générateurs et le régulateur global sont négligés. Cependant cette performance se détériore et le contrôleur global perd de sa robustesse quand les délais ne sont pas négligeables.

Le délai intervient dans plusieurs applications dont les processus industrielles. Ce délai causé par le temps de calcul, de mesure et de communication affecte d'une manière considérable la performance et la stabilité des processus de commande. Plusieurs études ont été effectuées pour pallier cet inconvénient. La plus classique et la plus utilisée est celle réalisée par Smith qui proposa un correcteur connu sous le nom de prédicteur de Smith [14]. D'autres études utilisent des approximations pour décrire le délai telle que l'approximation de Padé et reposent aussi sur l'utilisation des fonctions de Laguerre et Bessel pour représenter le délai [15].

Le réseau électrique est connu par sa grandeur et sa croissance permanente due à l'augmentation de la demande de l'énergie électrique ce qui fait que les différents composants du réseau sont dispersés et éloignés les uns des autres. Des délais interviennent donc dans les différentes mesures transmises au contrôleur global et aussi dans les signaux de communication entre le contrôleur global et les contrôleurs locaux. Récemment, quelques chercheurs ont consacré leurs travaux pour traiter le problème du délai dans la commande hiérarchisée et décentralisée des réseaux électriques. L'utilisation de l'approximation de Padé pour représenter le délai par N_i [15] a donné de bons résultats dans une commande hiérarchisée. Chaudhuri [16] suggère un contrôleur basé sur la théorie de H_∞ avec un prédicteur de Smith unifié (USP). Wu [17] et Heydt [18] proposent une méthode du séquençement de gains (gain scheduling) basée sur la théorie des inégalités linéaires de matrice (LMI) pour compenser le délai.

L'objectif principal de notre travail est premièrement l'application d'une commande globale linéaire sur un réseau électrique et ensuite la compensation des délais de mesure

et de communication qui interviennent dans cette commande globale en se basant sur le principe du prédicteur de Smith. Pour mieux comprendre et réaliser cet objectif, nous avons trouvé nécessaire de décomposer notre travail en cinq chapitres. Le chapitre 1 concerne la modélisation du réseau électrique. Nous utilisons l'approche multimachine qui intègre toutes les interactions dynamiques des générateurs. Le réseau électrique considéré dans notre étude est composé de (n) générateurs interconnectés à travers des lignes électriques, des transformateurs et alimentant des charges. Il s'agit en premier lieu de modéliser les constituants des générateurs qui sont la machine synchrone avec l'excitatrice et la turbine avec le servomoteur. Ensuite les lignes, les transformateurs et les charges seront modélisés comme des impédances constantes. Cette modélisation va nous permettre de décrire le réseau électrique par un ensemble d'équations algébriques et différentielles décrivant toutes les dynamiques des générateurs et leurs interactions [4]. Le chapitre 2 est un bref rappel sur les régulateurs conventionnels (locaux) des réseaux électriques qui sont le régulateur automatique de tension, le régulateur de vitesse et le stabilisateur de puissance. Dans ce chapitre nous présentons la structure de chaque régulateur et nous définissons brièvement leur principe de fonctionnement. Dans le chapitre 3, nous allons parler du contrôleur global linéaire. La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation. Un nouveau modèle [5] approprié pour la commande hiérarchisée est élaboré, il représente de façon claire les interactions entre les différents générateurs. Le modèle obtenu contient des non linéarités difficiles à manipuler. Une linéarisation autour d'un point d'équilibre s'avère nécessaire. Le modèle linéaire obtenu facilite l'utilisation du prédicteur de Smith. La deuxième partie du chapitre 3 permet de donner une large définition de la commande globale [7] et les avantages de cette commande pour l'amélioration de la stabilité du réseau électrique. Ensuite nous dégageons une loi de commande globale pour chaque générateur. Cette loi de commande permet d'éliminer les interactions entre les générateurs en découplant chaque générateur du réseau électrique par rapport aux autres générateurs. Le chapitre 4 concerne les différents tests de validation du contrôleur global linéaire. Ces tests permettent de juger de l'efficacité de ce dernier et de faire une comparaison avec la

performance des contrôleurs locaux. La commande hiérarchisée permet d'améliorer la performance des régulateurs conventionnels et d'amortir les oscillations locales et inter zones. Le chapitre 5, qui est le plus important de ce mémoire traite de la compensation des délais de mesure et de communication par le prédicteur de Smith. La première partie de ce chapitre débute par une description des différents travaux de recherche effectués dans le domaine de la compensation des délais dans la commande hiérarchisée des réseaux électriques. Nous allons continuer par un bref rappel sur le principe du prédicteur de Smith. La deuxième partie de ce chapitre présente l'existence des délais dans les équations du contrôleur global et l'application de la prédiction pour compenser les délais de mesure et de communication. Cette prédiction se fait par l'adaptation du prédicteur de Smith à notre travail. Nous concluons ce chapitre par la présentation et la discussion des résultats obtenus. Le mémoire se termine par une conclusion générale qui décrit les avantages et les limitations de notre travail et propose des perspectives à notre étude.

CHAPITRE 1

MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

1.1 Introduction

La modélisation des réseaux électriques est une phase importante avant la conception des compensateurs proprement dits. Plusieurs approches de modélisation existent dans la littérature. Parmi les plus importantes, on note l'approximation générateur barre infinie et le modèle multimachine. Pour plus de détails et d'informations sur ces deux approches de modélisation, le lecteur pourra consulter [4].

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle multimachine qui est un modèle global multi générateurs basé sur le modèle à deux axes de la machine synchrone. Ce modèle permet de décrire le réseau électrique par l'ensemble des équations dynamiques de tous les générateurs et l'équation algébrique de leurs interconnexions. Il intègre toutes les interactions dynamiques entre les générateurs.

Le réseau électrique considéré dans notre étude est composé de (n) générateurs alimentant des charges et interconnectés à travers des lignes électriques et des transformateurs. Nous allons en premier lieu modéliser les constituants du générateur (figure 1) qui sont la machine synchrone avec l'excitatrice et la turbine avec le servomoteur. Ensuite les lignes, les transformateurs et les charges sont modélisés comme des impédances constantes. Le modèle multimachine [2] obtenu est ensuite mis sous une forme plus appropriée pour appliquer la commande globale. Cette reformulation du modèle est présentée en détail dans le chapitre 3.

1.2 Modèle du générateur

Le générateur est un élément fondamental dans un réseau électrique. Un générateur tel qu'illustré dans la figure 1, est composé d'une machine synchrone avec son excitatrice et d'une turbine dont le vannage est contrôlé par un servomoteur. Ci-dessous nous présentons en détail le modèle de chaque composant du générateur.

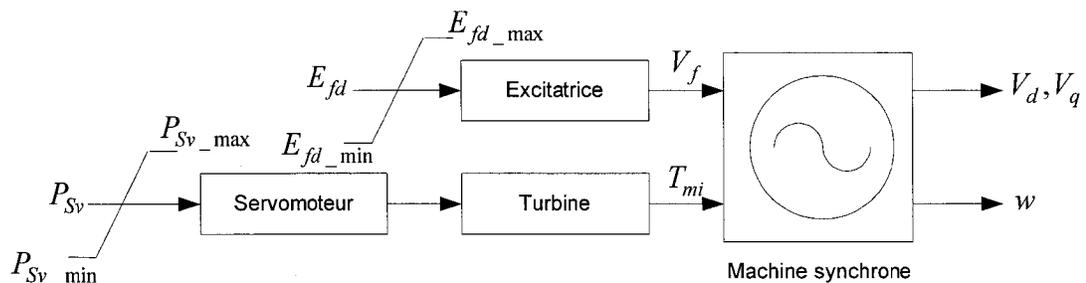


Figure 1 Composants du générateur

1.2.1 Modèle à deux axes d'une machine synchrone

La machine synchrone considérée est composée de trois enroulements au stator, un enroulement au rotor et deux enroulements amortisseurs. Son modèle est établi à partir du modèle complet qui est un système d'ordre 9. Certaines dynamiques rapides comme celle du stator et une partie de la dynamique des amortisseurs appelée dynamique sous transitoire seront négligées. Le modèle final obtenu est un système d'équations différentielles d'ordre 4, communément appelé modèle à deux axes.

Après l'application de la transformée de Park aux équations électriques de la machine synchrone et l'expression du modèle en unité réduite (p.u) nous aboutissons aux équations (1.1) à (1.6) [2]. Elles décrivent la dynamique de l'excitation, de l'acier dans l'axe (q), la dynamique de la vitesse et l'angle de charge du rotor.

$$T'_{doi} \dot{E}'_{qi} = -E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) i_{di} + E_{fdi} \quad (1.1)$$

$$T'_{qoi} \dot{E}'_{di} = -E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi}) i_{qi} \quad (1.2)$$

$$\dot{\delta}_i = w_i - w_S \quad (1.3)$$

$$2H \frac{dw_i}{dt} = (P_{mi} - E'_{di} i_{di} - E'_{qi} i_{qi} - (X'_{qi} - X'_{di}) i_{di} i_{qi}) \quad (1.4)$$

$$E'_{di} = R_{Si} i_{di} - X'_{qi} i_{qi} + V_{di} \quad (1.5)$$

$$E'_{qi} = R_{Si} i_{qi} + X'_{di} i_{di} + V_{qi} \quad (1.6)$$

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

E_{fdi} est la tension du champ d'excitation. i_{di} et i_{qi} sont les courants du stator dans le plan d/q. V_{di} et V_{qi} représentent les composantes de la tension terminale dans le plan d/q. R_{Si} est la résistance des enroulements du stator. E'_{di} , E'_{qi} , T'_{doi} et T'_{qoi} représentent respectivement les tensions internes transitoires et les constantes de temps transitoires. X_{di} , X_{qi} , X'_{di} et X'_{qi} sont les réactances synchrones et transitoires. δ_i est l'angle de charge du rotor, w_i et w_S sont respectivement sa vitesse de rotation et sa vitesse synchrone. P_{mi} la puissance mécanique et enfin H est la constante d'inertie du rotor.

1.2.2 Modèle de l'excitatrice

Il existe plusieurs types de système d'excitation pour les réseaux électriques. L'excitatrice à courant continu est constituée d'une génératrice à courant continu. L'excitatrice à courant alternatif est composée d'une génératrice à courant alternatif dont la sortie est redressée par un convertisseur CA-CC. Enfin l'excitatrice statique dans laquelle la tension aux bornes du générateur est directement redressée puis utilisée comme tension d'excitation. Sans perte de généralité, nous utilisons l'excitatrice de type statique. La dynamique de cette dernière est représentée par un gain.

1.2.3 Modèle de la turbine

Parmi les principaux modes de production de l'électricité on trouve les centrales hydroélectriques où la turbine est entraînée par la force de l'eau et les centrales thermiques qui produisent de l'électricité en entraînant des turbines à l'aide de la vapeur d'eau sous pression. La turbine est une composante essentielle du générateur car sans elle la machine synchrone ne peut produire de l'électricité. Pour une bonne compréhension et pour plus de détails sur les modèles des turbines, nous avons trouvé nécessaire de présenter à la fois ces deux types. Ci-dessous nous traitons successivement le modèle de la turbine thermique et celui de la turbine hydraulique.

1.2.3.1 Modèle de la turbine thermique

L'énergie mécanique utilisée pour entraîner l'alternateur est fournie par une turbine thermique. Cette dernière est composée d'une chaudière permettant de produire de la vapeur sous haute pression et d'un refroidisseur pour refroidir la vapeur qui sort de la turbine. La modélisation complète de tous ses éléments est fortement non linéaire. Un modèle linéaire simplifié de la turbine est généralement utilisé pour la commande et la stabilité des réseaux électriques. La linéarisation permet de décrire la turbine thermique par les deux équations différentielles suivantes [1] :

$$T_{RH_i} \dot{T}_{M_i} = -T_{M_i} + \left(1 - \frac{K_{HP_i} T_{RH_i}}{T_{CH_i}} \right) P_{CH_i} + \frac{K_{HP_i} T_{RH_i}}{T_{CH_i}} P_{SV_i} \quad (1.7)$$

$$T_{CH_i} \dot{P}_{CH_i} = -P_{CH_i} + P_{SV_i} \quad (1.8)$$

P_{SVi} est la position de la vanne, T_{Mi} représente le couple mécanique, P_{CHi} la pression de la vapeur, K_{HPi} la fraction de la puissance totale fournie par la haute pression (HP), enfin T_{RH} et T_{CH} sont les constantes de temps du refroidisseur et de la vapeur.

1.2.3.2 Modèle de la turbine hydraulique et servomoteur

Dans une turbine hydraulique, les vannes sont actionnées par un servomoteur. L'eau pénètre dans une conduite forcée pour augmenter sa vitesse. À la sortie de la conduite, elle fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'eau est ensuite évacuée par une galerie de fuite.

La modélisation de tous les composants de la turbine hydraulique aboutit à un modèle non linéaire décrit par les équations de la dynamique du débit et la puissance mécanique:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_W} \left(1 - \frac{q^2}{A_t^2 g^2}\right) \quad (1.9)$$

$$P_m = \frac{q^3}{A_t^2 g^2} \quad (1.10)$$

Une linéarisation autour d'un point de fonctionnement (g_0, q_0, P_0) permet d'aboutir au modèle linéaire :

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{2q_0}{T_W A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_W A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \quad (1.11)$$

$$P_m = \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^3}{A_t^2 g_0^3} (g - g_0) + P_0 \quad (1.12)$$

Au point de fonctionnement (g_0, q_0, P_0) nous avons les deux équations suivantes :

$$P_0 = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2} \quad (1.13)$$

$$q_0 = A_t g_0 = G_0 \quad (1.14)$$

Après simplification des expressions (1.11) et (1.12), le modèle linéaire de la turbine hydraulique avec le servomoteur est donné par les équations suivantes :

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{2}{T_W G_0} q + \frac{2A_t}{T_W G_0} g \quad (1.15)$$

$$\frac{dg}{dt} = -K_a g + K_a u \quad (1.16)$$

$$P_m = 3q - 2A_t g \quad (1.17)$$

$q, g, P_m, A_t, T_W, T_g, K_a$ et u sont respectivement le débit de l'eau dans la turbine, l'ouverture du vannage, la puissance mécanique fournie par la turbine, le gain de la turbine, le temps d'établissement du débit nominal, la constante de temps du servomoteur, le gain du servomoteur et enfin la commande du servomoteur. Notons que le modèle de la turbine hydraulique est un modèle connu qu'on peut trouver dans plusieurs références telles que [3].

1.3 Modélisation de l'interconnexion du réseau électrique

Les (n) générateurs et (m) barres du réseau électrique sont interconnectés entre eux par des transformateurs et des lignes électriques. Lorsque les charges sont des impédances constantes, le réseau est décrit par les deux équations algébriques ci-dessous [2]. La première représente l'équation des courants des barres avec générateurs et la deuxième, les courants des barres sans générateurs.

$$\frac{-1}{R_{Si} + jX'_{di}} \left(E'_{di} + (X'_{qi} - X'_{di})I_{qi} + jE'_{qi} \right) e^{j(\delta_i - \pi/2)} + \sum_{k=1}^m (G'_{ik} + jB'_{ik})V_k e^{j\theta_k} = 0 \quad (1.18)$$

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

Et

$$\sum_{k=1}^m (G'_{ik} + jB'_{ik})V_k e^{j\theta_k} = 0 \quad (1.19)$$

$$i = n+1, \dots, m$$

Dans cette matrice d'admittance, toutes les charges sont modélisées comme des impédances constantes. Le terme $(G'_{ik} + jB'_{ik})$ représente l'élément de la ligne i et de la colonne k de la matrice d'admittance tandis que le terme $\frac{1}{(R_{Si} + jX'_{di})}$ représente l'élément sur la $i^{\text{ème}}$ diagonale de la matrice d'admittance.

1.3.1 Référentiel absolu

La figure 2 illustre la relation qui existe entre le référentiel local (d_k, q_k) de chaque générateur et le référentiel absolu (D, Q) . Le référentiel absolu (D, Q) est un référentiel qui tourne à la vitesse synchrone tandis que le référentiel local (d_k, q_k) est propre à chaque générateur k et il tourne avec une vitesse ω_k . Cette relation permet de définir les variables δ_k et θ_k qui interviennent dans les équations précédentes (1.18) et (1.19). Notons que δ_k représente l'angle de charge de chaque générateur par rapport au référentiel absolu et θ_k l'angle de projection de la tension terminale V_k du générateur sur le référentiel absolu (D, Q) . La tension $V_k e^{j\theta_k}$ du générateur k dans le référentiel absolu est donnée par la relation suivante :

$$V_k e^{j\theta_k} = (V_{dk} + jV_{qk}) e^{j(\delta_k - \pi/2)} \quad (1.20)$$

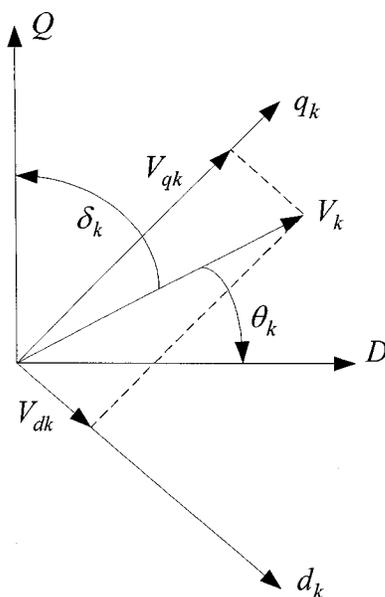


Figure 2 les repères absolu et local

1.3.2 Exemple de modélisation de l'interconnexion d'un réseau électrique

Pour faciliter la compréhension des équations (1.18) et (1.19) qui décrivent le modèle du réseau électrique, nous allons faire une application sur un réseau simple et réécrire les équations des courants des barres avec et sans générateurs. La figure 3 représente un réseau de 3 barres, dont le nombre des générateurs est $n = 2$ et le nombre de barres est $m = 3$.

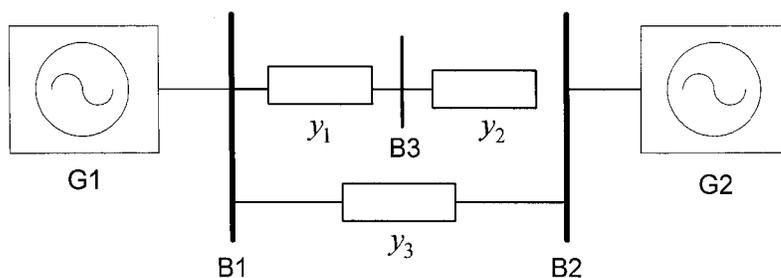


Figure 3 Exemple de réseau simple de 3 barres

À la barre B1, nous avons l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{-1}{R_{S1} + jX'_{d1}} \left(E'_{d1} + (X'_{q1} - X'_{d1})I_{q1} + jE'_{q1} \right) e^{j(\delta_1 - \pi/2)} + (G'_{11} + jB'_{11})V_1 e^{j\theta_1} \\ + (G'_{12} + jB'_{12})V_2 e^{j\theta_2} + (G'_{13} + jB'_{13})V_3 e^{j\theta_3} = 0 \end{aligned} \quad (1.21)$$

Avec

$$G'_{11} + jB'_{11} = y_1 + y_3 + \frac{1}{R_{S1} + jX'_{d1}} \quad (1.22)$$

$$G'_{12} + jB'_{12} = -y_3 \quad (1.23)$$

$$G'_{13} + jB'_{13} = -y_1 \quad (1.24)$$

À la barre B2, nous avons :

$$\begin{aligned} \frac{-1}{R_{S2} + jX'_{d2}} \left(E'_{d2} + (X'_{q2} - X'_{d2})I_{q2} + jE'_{q2} \right) e^{j(\delta_2 - \pi/2)} + (G'_{21} + jB'_{21})V_1 e^{j\theta_1} \\ + (G'_{22} + jB'_{22})V_2 e^{j\theta_2} + (G'_{23} + jB'_{23})V_3 e^{j\theta_3} = 0 \end{aligned} \quad (1.25)$$

Avec

$$G'_{22} + jB'_{22} = y_2 + y_3 + \frac{1}{R_{S2} + jX'_{d2}} \quad (1.26)$$

$$G'_{21} + jB'_{21} = -y_3 \quad (1.27)$$

$$G'_{23} + jB'_{23} = -y_2 \quad (1.28)$$

L'équation des courants à la barre B3 est :

$$(G'_{31} + jB'_{31})V_1 e^{j\theta_1} + (G'_{32} + jB'_{32})V_2 e^{j\theta_2} + (G'_{33} + jB'_{33})V_3 e^{j\theta_3} = 0 \quad (1.29)$$

Avec

$$G'_{31} + jB'_{31} = -y_1 \quad (1.30)$$

$$G'_{32} + jB'_{32} = -y_2 \quad (1.31)$$

$$G'_{33} + jB'_{33} = y_1 + y_2 \quad (1.32)$$

Après la modélisation du réseau électrique, le deuxième chapitre est une introduction aux régulateurs conventionnels des générateurs.

CHAPITRE 2

INTRODUCTION AUX RÉGULATEURS CONVENTIONNELS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

2.1 Introduction

Ce chapitre traite des différents équipements qui permettent le bon fonctionnement des réseaux électriques. La stabilité locale des réseaux électriques est assurée entre autres par les régulateurs conventionnels qui sont composés d'un régulateur automatique de tension (AVR) qui permet de réguler la tension terminale, d'un régulateur de vitesse (Speed governor) qui lui contrôle la vitesse et d'un stabilisateur de puissance (PSS) qui amortit les oscillations locales et inter zones. Cette introduction à la commande locale des générateurs va nous faciliter l'étude et la compréhension de la commande globale.

Les sections subséquentes font un rappel sur ces régulateurs conventionnels, présentent la structure de chaque régulateur et définissent brièvement leur principe de fonctionnement. Les valeurs des paramètres de chaque régulateur sont données dans l'annexe 3.

2.2 Régulateur automatique de tension

La sortie de l'AVR dépend uniquement de la tension terminale. Il agit sur l'excitatrice du générateur afin de maintenir la tension terminale constante. La figure suivante représente le schéma de principe de la régulation de tension sur une génératrice.

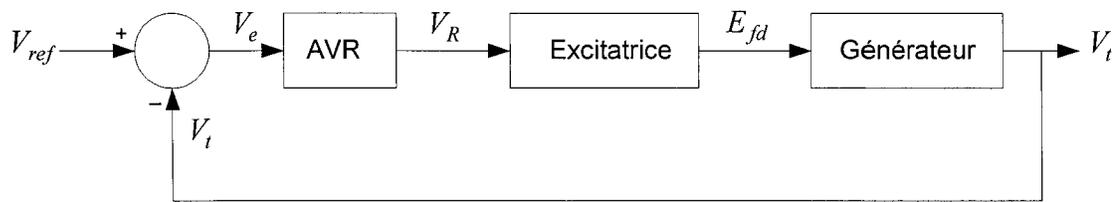


Figure 4 Principe de la régulation de tension

L'AVR et l'excitatrice constituent le système d'excitation du générateur. Il existe plusieurs types de systèmes d'excitation. L'excitatrice à courant continu (la tension d'excitation provient d'un générateur auxiliaire à courant continu), à courant alternatif (la tension d'excitation provenant d'un générateur auxiliaire à courant alternatif est redressée par un convertisseur CA-CC) et l'excitation statique pour laquelle la tension d'excitation provient du générateur lui-même est redressée puis utilisée directement comme tension d'excitation. Ci-dessous est présenté le type DC1A qui est un système d'excitation à courant continu standardisé par IEEE.

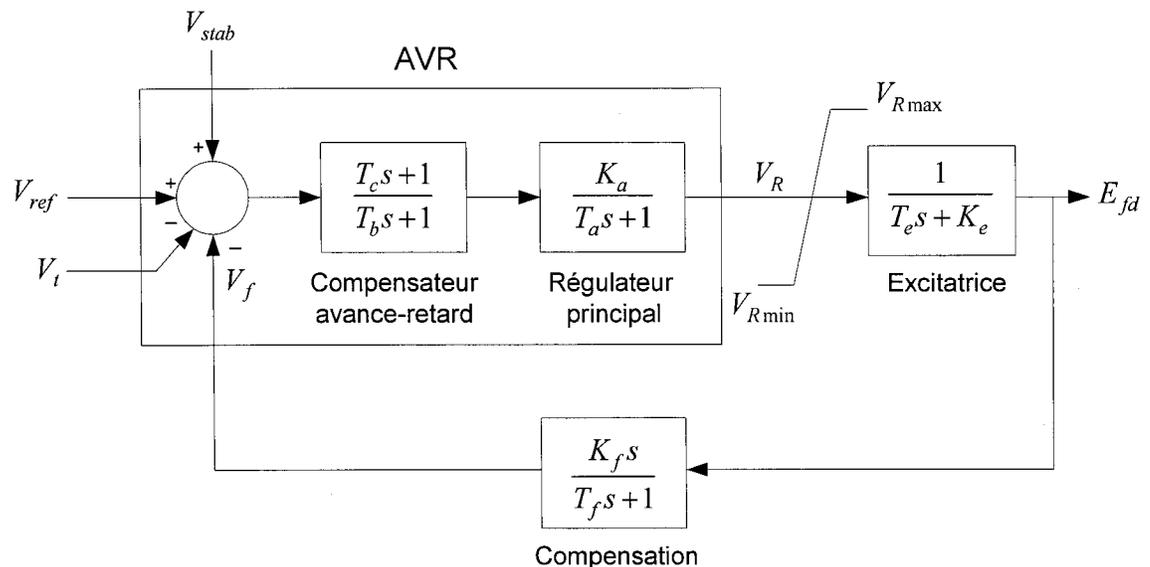


Figure 5 Système d'excitation de type DC1A de IEEE

Le régulateur de tension a pour entrée la tension de référence qui constitue la consigne, la tension terminale provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation provenant du stabilisateur de puissance et enfin un retour de la sortie après avoir passé par un amortissement (compensation). La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un compensateur de phase puis par le régulateur principal. Notons que la sortie du régulateur qui est l'excitation est limitée par une saturation avant d'alimenter l'excitatrice.

2.3 Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de réguler la vitesse ou la puissance fournie par la turbine en cas d'une variation de la fréquence du réseau électrique. La boucle de régulation (figure 6) est composée généralement d'un régulateur de type PID (proportionnel, intégral et dérivée), d'un servomoteur et d'une turbine.

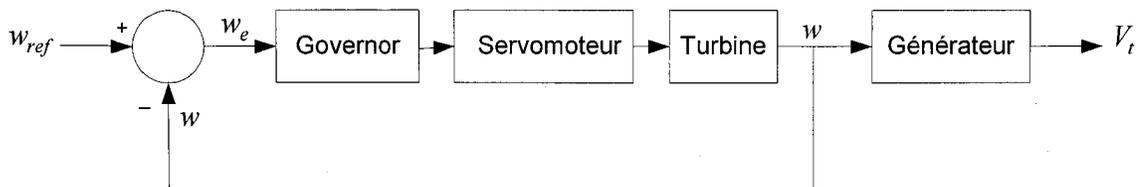


Figure 6 Principe de la régulation de vitesse

La figure 7 représente un régulateur de vitesse de type PID dans une boucle de régulation. Le PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale. Le statisme a pour rôle le partage de la charge totale du réseau entre les différents générateurs. Il permet d'assurer le bon fonctionnement de plusieurs turbines dans un réseau électrique. Un exemple des valeurs des paramètres K_p , K_d et K_i du régulateur de vitesse (PID) est présenté dans l'annexe 3.

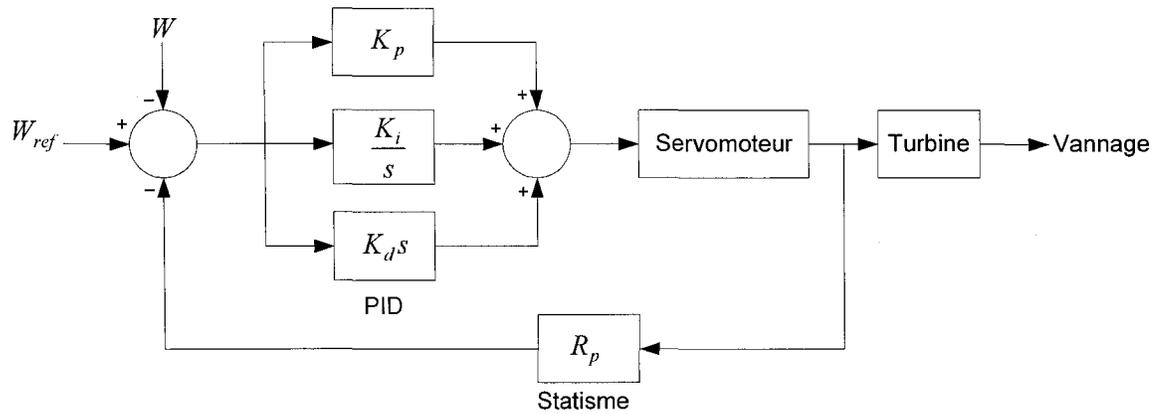


Figure 7 Régulateur de vitesse de type PID

Enfin, la figure 8 représente le modèle du servomoteur qui sert à commander l'ouverture du vannage de la turbine. Ce modèle est décrit par une fonction de transfert simple du premier ordre $\frac{K_a}{T_a s + 1}$ semblable à celle d'un moteur électrique. En commandant l'ouverture de la vanne, il génère la vitesse de rotation de la turbine, cette dernière est limitée par les constantes \dot{g}_{\max} et \dot{g}_{\min} qui représentent respectivement la vitesse maximum et minimum pour l'ouverture du vannage de la turbine. Cette vitesse est ensuite intégrée pour donner la position du vannage qui est aussi limitée par une saturation.

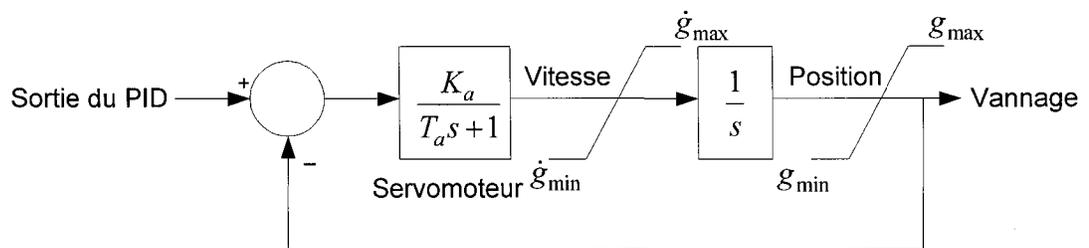


Figure 8 Schéma bloc du servomoteur

2.4 Stabilisateur de puissance

Le stabilisateur de puissance (PSS) permet d'amortir les oscillations locales et inter zones. Il fonctionne avec le régulateur automatique de tension en ajoutant une entrée supplémentaire au système d'excitation. La figure 9 illustre la configuration générale d'un PSS avec un système d'excitation de type DC1A de IEEE. Le stabilisateur de puissance peut entre autres utiliser comme entrée l'écart entre la vitesse de la machine et la vitesse nominale $w - w_{ref}$ et a pour sortie la tension de stabilisation V_{stab} .

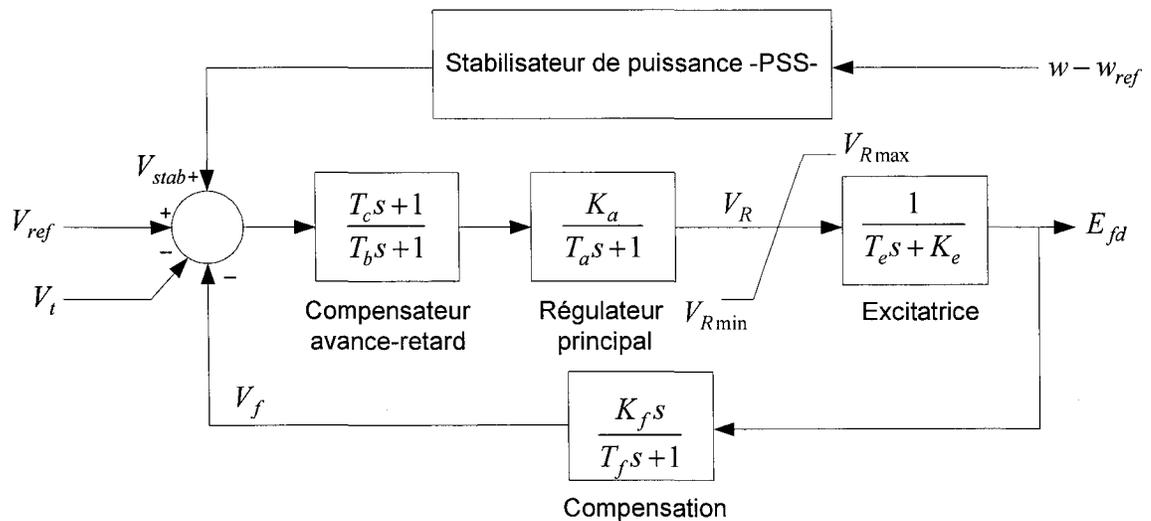


Figure 9 Système d'excitation de type DC1A de IEEE avec PSS

Il existe plusieurs types de stabilisateurs utilisés dans la commande des réseaux électriques. Les plus importants sont le modèle conventionnel à une entrée type IEEE PSS1A (figure 10) et le nouveau modèle multi-bandes PSS4B (figure 11). Le PSS1A est constitué d'un gain (K_{stab}) qui détermine le niveau d'amortissement du PSS, d'un filtre passe-haut qui va permettre au PSS d'agir seulement en cas de variation rapide de vitesse et éliminer l'action de ce dernier lorsque la vitesse de la machine est constante et enfin un compensateur de phase.

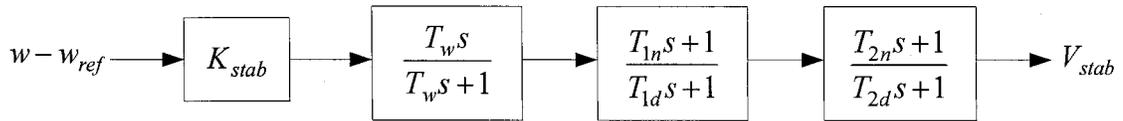


Figure 10 Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS1A

Comme il est illustré dans la figure 11, le stabilisateur multi-bandes PSS4B est constitué de trois bandes de fréquence pour traiter les oscillations à basses, moyennes et hautes fréquences [13]. Il est plus performant que le PSS conventionnel et permet un amortissement efficace des oscillations locales, inter zones et globale que l'on peut retrouver dans un réseau électrique.

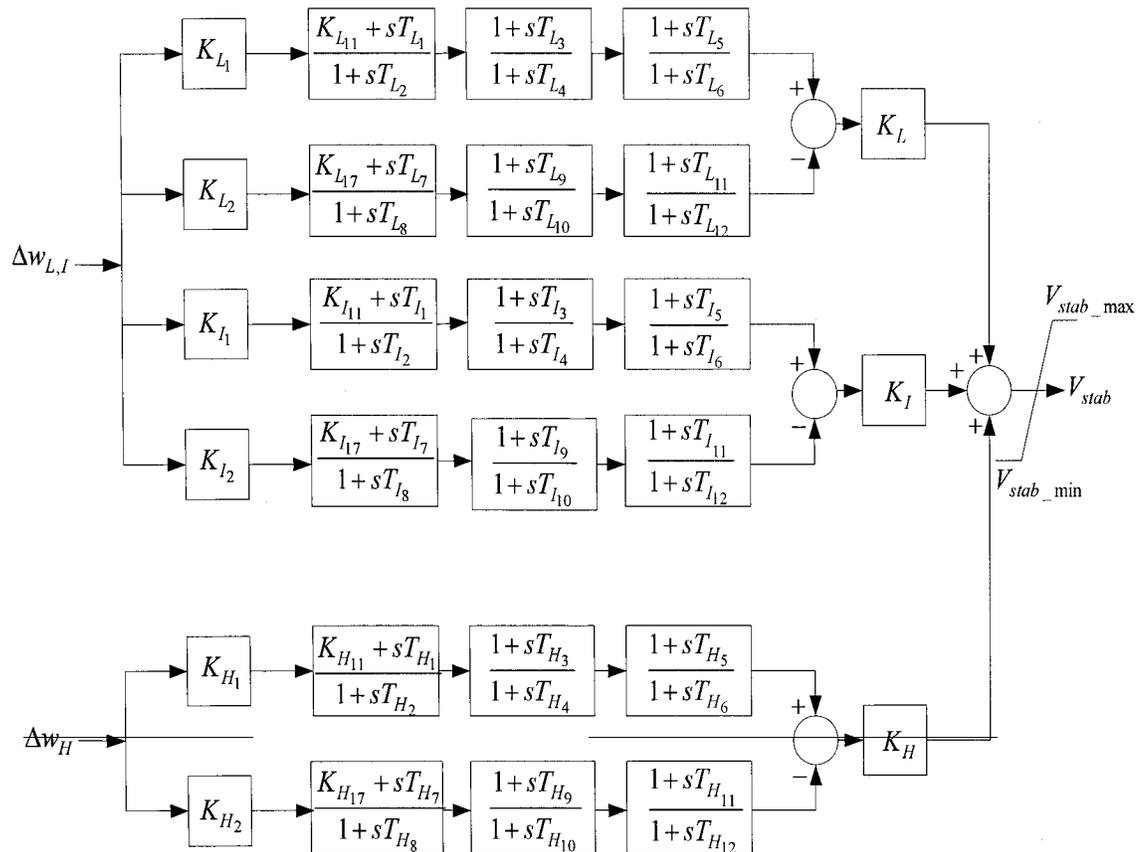


Figure 11 Stabilisateur multi-bandes de type IEEE PSS4B

L'action bénéfique des générateurs sur la stabilité d'un réseau électrique est donc obtenue par trois régulateurs, soit les régulateurs de tension et de vitesse et le stabilisateur de puissance. Cependant cette structure travaille d'une façon non coordonnée pour régler deux variables qui sont la vitesse et la tension du réseau électrique. Le stabilisateur de puissance (PSS) et le régulateur automatique de tension (AVR) agissent simultanément de façon indépendante sur l'excitation de la génératrice. L'utilisation du stabilisateur ajoute un compromis de performance entre la fonction de la régulation de la tension et l'amortissement des oscillations électromécaniques. D'autres inconvénients affectent la performance de cette structure, notamment le caractère linéaire de ces régulateurs et la méthode de réglage des paramètres du PSS [4].

Dans le chapitre 3, nous allons présenter une nouvelle approche de commande qui est basée sur les signaux à la grandeur du réseau électrique. Cette commande globale représente une nouvelle alternative pour améliorer la performance de la structure (régulateur de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur) et l'amortissement des oscillations inter zones.

CHAPITRE 3

LE CONTRÔLEUR GLOBAL LINÉAIRE

3.1 Introduction

La demande toujours croissante de l'énergie électrique a engendré une augmentation de la capacité et de la complexité des réseaux électriques. Les distances qui séparent les composants du réseau électrique et les interactions entre ces derniers augmentent la probabilité de perturbations et d'oscillations électromécaniques qui en résultent. Ces perturbations ont des effets néfastes sur la stabilité du réseau électrique. Notons que cette dernière est assurée entre autres par les régulateurs conventionnels de machines qui ne permettent pas toujours d'assurer à eux seuls la stabilité du réseau en cas de défauts sévères. Il y'a donc place à l'amélioration des boucles de régulation de machines pour accroître la robustesse globale du réseau.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer une nouvelle approche de commande dite commande globale qui est basée sur les mesures à la grandeur du réseau [7]. Cette nouvelle approche permet d'améliorer la performance et l'efficacité des régulateurs locaux, d'amortir les oscillations inter zones et d'assurer une bonne stabilité globale. Pour ce faire, nous allons décomposer ce chapitre en deux parties. La première partie consiste à présenter un nouveau modèle multimachine linéaire approprié pour la commande hiérarchisée (globale). La deuxième partie concerne la conception du contrôleur global linéaire.

3.2 Nouveau modèle global du réseau électrique

La modélisation de tous les composants du réseau électrique présentés au chapitre 1 aboutit au modèle multimachine décrit par les équations (3.1) à (3.8). Ce modèle quoique représentant toutes les dynamiques du système, ne semble pas approprié pour l'application des techniques de commande moderne. En effet il dépend des courants I_{di} , I_{qi} et des tensions des barres non équipées de générateurs $V_k e^{j\theta_k}$ qui ne sont pas des variables d'état. De plus la tension interne E'_{di} n'est pas facilement mesurable.

$$T'_{doi} \dot{E}'_{qi} = -E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) i_{di} + E_{fdi} \quad (3.1)$$

$$T'_{qoi} \dot{E}'_{di} = -E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi}) i_{qi} \quad (3.2)$$

$$\dot{\delta}_i = w_i - w_S \quad (3.3)$$

$$\frac{2H}{w_S} \dot{w}_i = (T_{mi} - E'_{di} i_{di} - E'_{qi} i_{qi} - (X'_{qi} - X'_{di}) i_{di} i_{qi}) \quad (3.4)$$

$$V_{di} = E'_{di} - R_{Si} i_{di} + X'_{qi} i_{qi} \quad (3.5)$$

$$V_{qi} = E'_{qi} - R_{Si} i_{qi} - X'_{di} i_{di} \quad (3.6)$$

$$\frac{-1}{R_{si} + jX'_{di}} (E'_{di} + (X'_{qi} - X'_{di}) I_{qi} + jE'_{qi}) e^{j(\delta_i - \pi/2)} + \sum_{k=1}^m (G'_{ik} + jB'_{ik}) V_k e^{j\theta_k} = 0 \quad (3.7)$$

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

$$\sum_{k=1}^m (G'_{ik} + jB'_{ik}) V_k e^{j\theta_k} = 0 \quad (3.8)$$

$$i = n + 1, \dots, m$$

Ce paragraphe propose une reformulation du modèle multimachine obtenu en effectuant des changements de variables. Le but est d'avoir un modèle dans lequel les composantes de la tension terminale V_{di} et V_{qi} sont les variables d'état au lieu des tensions transitoires internes E'_{di} et E'_{qi} . Les étapes suivantes résument brièvement la procédure à suivre pour l'obtention de ce modèle :

- À partir de l'équation (3.8), nous allons exprimer les tensions aux bornes des barres sans générateurs en fonction des tensions terminales des autres générateurs (V_{di} et V_{qi}) et les remplacer dans l'équation (3.7).
- Dans l'équation obtenue, exprimons les tensions internes E'_{di} et E'_{qi} en fonction des tensions V_{di} et V_{qi} .
- Nous remplaçons E'_{di} et E'_{qi} dans (3.5) et (3.6) ce qui va donner les courants I_{di} et I_{qi} en fonction de leurs tensions V_{di} et V_{qi} .
- Nous dérivons E'_{di} et E'_{qi} , ensuite nous remplaçons les courants trouvés I_{di} et I_{qi} dans (3.1) et (3.2).

Le modèle final obtenu après ces étapes est un modèle global qui comporte toutes les interactions entre les générateurs et dans lequel les variables d'état locales (de chaque générateur i) et les variables d'état globales (des autres générateurs k) sont bien distinctes. Ce nouveau modèle global contient des variables d'état faciles à mesurer et il peut être utilisé pour la commande hiérarchisée. Pour plus d'informations sur ce modèle, le lecteur peut consulter [5].

$$\dot{V}_{di} = \alpha_{1i}V_{di} + \alpha_{2i}V_{qi} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di} \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_{qi} = \beta_{1i}V_{di} + \beta_{2i}V_{qi} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi} \quad (3.10)$$

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_i}{dt} = T_{Mi} - G_{ii}^f (V_{di}^2 + V_{qi}^2) - \psi_{wi} \quad (3.11)$$

$$\dot{\delta}_i = w_i - w_s \quad (3.12)$$

Avec

$$\begin{aligned} \psi_{di} = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}^d) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}^d) V_{qk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{dk} \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{qk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) \dot{V}_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) \dot{V}_{qk} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \psi_{qi} = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}^q) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}^q) V_{qk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{dk} \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{qk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) \dot{V}_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) \dot{V}_{qk} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \psi_{wi} = & V_{di} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \\ & + V_{qi} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Notons que δ_{ik} et w_{ik} représentent respectivement les écarts d'angle de charge ($\delta_k - \delta_i$) et de vitesse ($w_k - w_i$) entre les générateurs i et k . Les expressions des paramètres intervenant dans ce modèle sont présentées dans l'annexe 2.

Les termes ψ_{di} , ψ_{qi} et ψ_{wi} représentent les interactions entre le générateur i et les autres générateurs k . Ils contiennent des non linéarités qui rendent le modèle global du

réseau électrique difficile à manipuler. Notre prochaine étape, c'est de trouver l'équivalent linéaire du modèle par linéarisation autour d'un point de fonctionnement. Le modèle linéaire obtenu va nous permettre d'établir les équations du contrôleur global linéaire.

3.2.1 Rappel sur la linéarisation autour du point de fonctionnement

Cette méthode est basée sur le développement en série de Taylor de la fonction $f(x)$ autour du point de fonctionnement x_0 :

$$f(x) = f(x_0) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x_0} \cdot (x - x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right|_{x_0} \cdot (x - x_0)^2 + \dots \quad (3.16)$$

Considérons le système non linéaire suivant :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.17)$$

Avec (x_0, u_0) un point d'équilibre tel que :

$$\dot{x} = f(x_0, u_0) = 0 \quad (3.18)$$

En négligeant les termes supérieurs à l'ordre 1 dans le développement de Taylor de (3.17), on aboutit au système linéaire suivant :

$$\dot{x} = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{(x_0, u_0)} \cdot (x - x_0) + \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{(x_0, u_0)} \cdot (u - u_0) \quad (3.19)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (3.20)$$

Avec

$$\Delta x = x - x_0 \quad (3.21)$$

$$\Delta u = u - u_0 \quad (3.22)$$

Et

$$A = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{(x_0, u_0)} \quad (3.23)$$

$$B = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{(x_0, u_0)} \quad (3.24)$$

Notons que $\frac{\partial f(x, u)}{\partial x}$ et $\frac{\partial f(x, u)}{\partial u}$ sont les jacobiens de $f(x, u)$ par rapport à x et u .

3.2.2 Le modèle global linéaire

Pour arriver à un système linéaire équivalent au système non linéaire décrit par les équations (3.9) à (3.15), nous procédons à une linéarisation des termes (3.13), (3.14) et (3.15) qui représentent les non linéarités du modèle. Nous avons jugé nécessaire de passer par les étapes ci-dessous. Pour plus de détails sur la linéarisation du modèle, le lecteur peut consulter l'annexe 1.

Étape 1 : Changement de variables η_i, Z_i

Nous posons :

$$X_{1i} = V_{di}, X_{2i} = V_{qi} \quad (3.25)$$

À l'équilibre :

$$X_{1ie} = V_{die}, X_{2ie} = V_{qie} \quad (3.26)$$

Avec :

$$\Delta X_{1i} = X_{1i} - X_{1ie} \quad (3.27)$$

$$\Delta X_{2i} = X_{2i} - X_{2ie} \quad (3.28)$$

La première étape consiste à faire le changement de variables (3.29) et (3.30). Ce changement de variables s'inspire de la méthode de linéarisation entrée-sortie. Elle est motivée par la volonté d'utiliser la tension terminale comme variable d'état. La seconde variable η_i est introduite pour obtenir une bijection : $(V_{di}, V_{qi}) \rightarrow (\eta_i, Z_i)$.

$$\eta_i = \rho_{2i} \Delta X_{1i} - \rho_{1i} \Delta X_{2i} \quad (3.29)$$

$$Z_i = 2X_{1ie} \Delta X_{1i} + 2X_{2ie} \Delta X_{2i} \quad (3.30)$$

Étape 2 : Linéarisation de la sortie y_{li}

Nous introduisons la sortie y_{li} qui représente la tension terminale d'un générateur :

$$y_{li} = V_{di}^2 + V_{qi}^2 = V_i^2 \quad (3.31)$$

$$y_{li} = X_{1i}^2 + X_{2i}^2 \quad (3.32)$$

Une linéarisation autour du point d'équilibre (X_{1ie}, X_{2ie}) nous permet d'écrire :

$$y_{li} = X_{1ie}^2 + X_{2ie}^2 + 2X_{1ie} (X_{1i} - X_{1ie}) + 2X_{2ie} (X_{2i} - X_{2ie}) \quad (3.33)$$

Avec :

$$\Delta X_{1i} = X_{1i} - X_{1ie} \quad (3.34)$$

$$\Delta X_{2i} = X_{2i} - X_{2ie} \quad (3.35)$$

$$y_{1e} = X_{1ie}^2 + X_{2ie}^2 \quad (3.36)$$

L'erreur sur la sortie linéaire est alors :

$$\Delta y_{li} = y_{li} - y_{1e} \quad (3.37)$$

$$\Delta y_{li} = 2X_{1ie} \Delta X_{1i} + 2X_{2ie} \Delta X_{2i} \quad (3.38)$$

Avec le changement de variable, on aura :

$$\Delta y_{li} = Z_i \quad (3.39)$$

Étape 3 : Linéarisation des termes ψ_{di} et ψ_{qi}

Les termes ψ_{di} et ψ_{qi} après la linéarisation sont de la forme suivante :

$$\psi_{di}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (A_{ik}^d \Delta X_{1k} + B_{ik}^d \Delta X_{2k} + C_{ik}^d \Delta X_{3k} + H_{ik}^d \Delta \dot{X}_{1k} + I_{ik}^d \Delta \dot{X}_{2k}) \quad (3.40)$$

$$\psi_{qi}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (A_{ik}^q \Delta X_{1k} + B_{ik}^q \Delta X_{2k} + C_{ik}^q \Delta X_{3k} + H_{ik}^q \Delta \dot{X}_{1k} + I_{ik}^q \Delta \dot{X}_{2k}) \quad (3.41)$$

Les termes ψ_{di}^L et ψ_{qi}^L en fonction des nouvelles variables d'état $\eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} ont la forme suivante :

$$\psi_{di}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (D_{ik}^d \eta_k + E_{ik}^d Z_k + F_{ik}^d \Delta X_{3k} + I_{ik}^d \dot{\eta}_k + J_{ik}^d \dot{Z}_k) \quad (3.42)$$

$$\psi_{qi}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (D_{ik}^q \eta_k + E_{ik}^q Z_k + F_{ik}^q \Delta X_{3k} + I_{ik}^q \dot{\eta}_k + J_{ik}^q \dot{Z}_k) \quad (3.43)$$

Étape 4 : Calcul de la dynamique de la première variable d'état $\dot{\eta}_i$

$$\eta_i = \rho_{2i} \Delta X_{1i} - \rho_{1i} \Delta X_{2i} \quad (3.44)$$

$$\dot{\eta}_i = \rho_{2i} \Delta \dot{X}_{1i} - \rho_{1i} \Delta \dot{X}_{2i} \quad (3.45)$$

Dans (3.45), nous remplaçons $\Delta\dot{X}_{1i}$ et $\Delta\dot{X}_{2i}$ par leurs expressions (3.9) et (3.10) :

$$\dot{\eta}_i = \rho_{2i}(\alpha_{1i}\Delta X_{1i} + \alpha_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L) - \rho_{1i}(\beta_{1i}\Delta X_{1i} + \beta_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L) \quad (3.46)$$

$$\dot{\eta}_i = (\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i})\Delta X_{1i} + (\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})\Delta X_{2i} + \rho_{2i}\psi_{di}^L - \rho_{1i}\psi_{qi}^L \quad (3.47)$$

Ensuite nous exprimons $\dot{\eta}_i$ en fonction des nouvelles variables $\eta_i, Z_i, \eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} , ce qui nous donne :

$$\dot{\eta}_i = K_{1i}\eta_i + K_{2i}Z_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (K_{3ik}\eta_k + K_{4ik}Z_k + K_{5ik}\Delta X_{3k} + K_{6ik}\dot{\eta}_k + K_{7ik}\dot{Z}_k) \quad (3.48)$$

Les termes K_{1i}, K_{2i} représentent les paramètres locaux du générateur i , et les termes $K_{3ik}, K_{4ik}, K_{5ik}, K_{6ik}$ et K_{7ik} les interactions avec les autres générateurs k .

Étape 5 : Calcul de la dynamique de la deuxième variable d'état \dot{Z}_i

$$Z_i = 2X_{1ie}\Delta X_{1i} + 2X_{2ie}\Delta X_{2i} \quad (3.49)$$

$$\dot{Z}_i = 2X_{1ie}\Delta\dot{X}_{1i} + 2X_{2ie}\Delta\dot{X}_{2i} \quad (3.50)$$

Dans (3.50), nous remplaçons $\Delta\dot{X}_{1i}$ et $\Delta\dot{X}_{2i}$ par leurs expressions (3.9) et (3.10) :

$$\dot{Z}_i = 2X_{1ie}(\alpha_{1i}\Delta X_{1i} + \alpha_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L) + 2X_{2ie}(\beta_{1i}\Delta X_{1i} + \beta_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L) \quad (3.51)$$

$$\dot{Z}_i = 2(X_{1ie}\alpha_{1i} + X_{2ie}\beta_{1i})\Delta X_{1i} + 2(X_{1ie}\alpha_{2i} + X_{2ie}\beta_{2i})\Delta X_{2i} + 2(X_{1ie}\rho_{1i} + X_{2ie}\rho_{2i})E_{fdi} + 2(X_{1ie}\psi_{di}^L + X_{2ie}\psi_{qi}^L) \quad (3.52)$$

Nous exprimons ensuite \dot{Z}_i en fonction de $\eta_i, Z_i, \eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} , ce qui nous permet d'écrire \dot{Z}_i comme suit :

$$\dot{Z}_i = T_{1i}\eta_i + T_{2i}Z_i + T_{3i}E_{fdi} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (T_{4ik}\eta_k + T_{5ik}Z_k + T_{6ik}\Delta X_{3k} + T_{7ik}\dot{\eta}_k + T_{8ik}\dot{Z}_k) \quad (3.53)$$

Les termes T_{1i}, T_{2i} et T_{3i} représentent les paramètres locaux du générateur i , et les termes $T_{4ik}, T_{5ik}, T_{6ik}, T_{7ik}$ et T_{8ik} les interactions avec les autres générateurs k .

Étape 6 : Linéarisation de ψ_{wi}

L'expression de ψ_{wi} après linéarisation est donnée par l'équation suivante :

$$\psi_{wi}^L = \mu_{1i}\Delta X_{1i} + \mu_{2i}\Delta X_{2i} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (\mu_{3ik}\Delta X_{1k} + \mu_{4ik}\Delta X_{2k} + \mu_{5ik}\Delta X_{3k}) \quad (3.54)$$

Nous remplaçons $\Delta X_{1i}, \Delta X_{2i}, \Delta X_{1k}$ et ΔX_{2k} par les nouvelles variables d'état η_i, Z_i, Z_k, η_k et ΔX_{3k} on obtient :

$$\psi_{wi}^L = R_{1i}\eta_i + R_{2i}Z_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k}) \quad (3.55)$$

Étape 7: Calcul de $\frac{dw_i}{dt}$

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_i}{dt} = T_{Mi} - G_{ii}^f (V_{di}^2 + V_{qi}^2) - \psi_{wi} \quad (3.56)$$

Nous remplaçons y_{li} et ψ_{wi} par leurs valeurs linéaires Z_i et ψ_{wi}^L dans l'équation (3.56) :

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{w_s}{2H_i} (T_{Mi} - R_{1i}\eta_i - (R_{2i} + G_{ii}^f)Z_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k})) \quad (3.57)$$

Étape 8 : Forme matricielle

Enfin le système linéaire a la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_i \\ \dot{Z}_i \\ \dot{\delta}_i \\ \dot{w}_i \\ \dot{T}_{Mi} \\ \dot{P}_{CHi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1i} & K_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{1i} & T_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-w_s R_{1i}}{2H_i} & \frac{-(R_{2i} + G_{ii}^f)w_s}{2H_i} & 0 & 0 & \frac{w_s}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{RH_i}} & \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \\ \Delta\delta_i \\ w_i - w_s \\ T_{Mi} \\ P_{CHi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_{3i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \\ 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{fdi} \\ P_{SVi} \end{bmatrix} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \begin{bmatrix} K_{3ik} & K_{4ik} & K_{5ik} & K_{6ik} & K_{7ik} \\ T_{4ik} & T_{5ik} & T_{6ik} & T_{7ik} & T_{8ik} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{3ik}w_s}{2H_i} & \frac{-R_{4ik}w_s}{2H_i} & \frac{-R_{5ik}w_s}{2H_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_k \\ Z_k \\ \Delta X_{3k} \\ \dot{\eta}_k \\ \dot{Z}_k \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$\Delta \dot{X}_i = A_i \Delta X_i + B_i \Delta U_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m A_{ik} \Delta X_k \quad (3.59)$$

$$\Delta Y_i = C_i \Delta X_i \quad (3.60)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta y_{1i} \\ \Delta y_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \\ \Delta \delta_i \\ w_i - w_s \\ T_{Mi} \\ P_{CHi} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Les deux sorties du système sont l'erreur sur la tension Δy_{1i} et l'erreur sur la vitesse Δy_{2i} :

$$\Delta y_{1i} = Z_i \quad (3.62)$$

$$\Delta y_{2i} = w_i - w_s \quad (3.63)$$

Dans l'équation du modèle linéaire (3.58), les termes locaux et les termes globaux sont bien distincts. Les termes en i représentent les variables locales de chaque générateur et les autres termes en k les interactions avec les autres générateurs du réseau électrique.

Les matrices A_i , B_i et A_{ik} sont composées de coefficients constants leurs expressions sont présentées dans l'annexe 2.

3.3 Validation du modèle du réseau électrique par observateur

L'objectif de ce paragraphe est de valider le modèle (3.58-3.60). C'est-à-dire à quel point il est proche du modèle non linéaire du réseau électrique. Nous allons donc construire un observateur qui à partir des données d'entrée u et de sortie y , reconstitue une approximation $\hat{x}(t)$ de la variable réelle $x(t)$. Si $\hat{x}(t)$ et $x(t)$ sont très proches alors le modèle linéaire approxime bien le réseau multi générateurs.

L'utilisation de cette méthode de validation est justifiée par deux raisons :

- La précision du modèle est essentielle pour la prédiction.
- Cette méthode de validation est inhabituelle cependant elle se justifie aisément.

La figure 12 illustre la structure du schéma de validation du modèle du réseau.

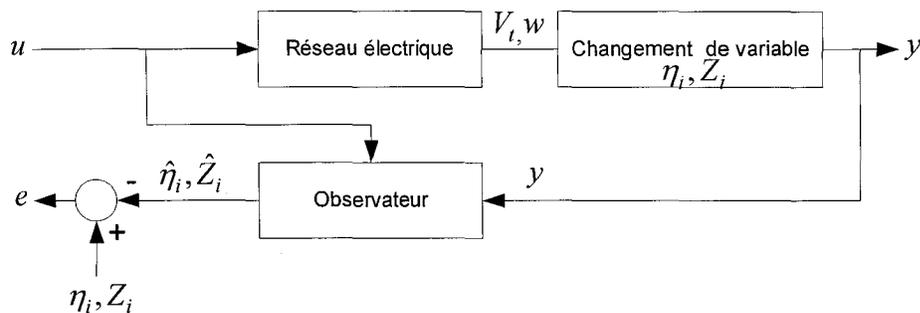


Figure 12 Observateur du réseau électrique

Pour plus de simplification, nous pouvons réécrire l'équation (3.59) du réseau électrique sous la forme suivante :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.64)$$

$$y = Cx \quad (3.65)$$

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ représente le vecteur d'état de l'ensemble des générateurs et (n) le nombre des générateurs du réseau électrique. La matrice A est la matrice globale qui contient les éléments de la matrice A_{ik} et les éléments de la matrice A_i sur la diagonale.

L'observateur est décrit par les équations suivantes :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + H(y - \hat{y}) \quad (3.66)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (3.67)$$

L'équation de l'observateur devient :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + H(y - C\hat{x}) \quad (3.68)$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - HC)\hat{x} + Bu + Hy \quad (3.69)$$

Considérons le signal d'erreur :

$$e = x - \hat{x} \quad (3.70)$$

Il s'agit de déterminer le paramètre H afin que l'erreur (e) entre la variable réelle x et la variable estimée \hat{x} soit minimisée ou converge rapidement vers zéro. Dans notre étude le vecteur H est représenté par des grandes valeurs. Ses valeurs ont permis une convergence rapide de l'erreur vers zéro.

Le réseau test figure 13 est un réseau électrique d'Hydro-Québec simplifié. Il comporte deux zones. La première zone est constituée des générateurs G_1, G_2 et G_3 et la deuxième comprend un seul générateur G_4 . À l'équilibre, les générateurs G_1, G_2, G_3 et G_4 produisent respectivement 4116MW, 1000MW, 537MW et 35000MW. Le test consiste en un court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1 auxquels sont raccordés les générateurs G_1, G_2 et G_3 . Notons que la régulation du réseau électrique dans ce cas est assurée seulement par les régulateurs locaux sans l'utilisation du contrôleur global.

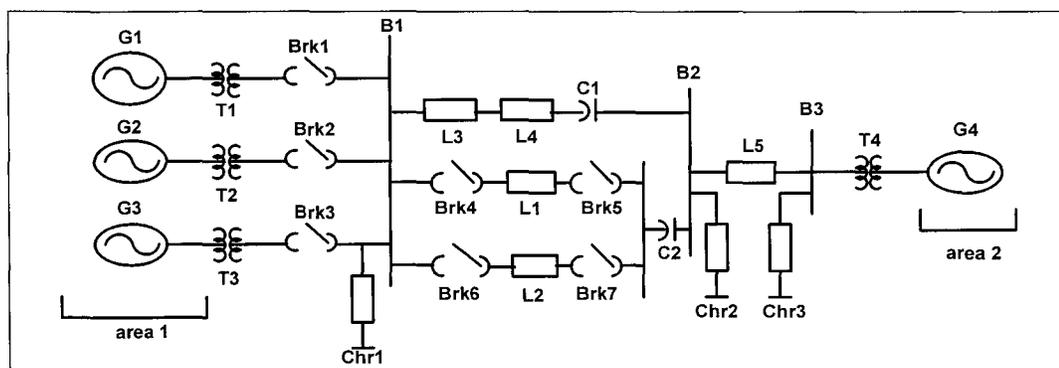


Figure 13 Le réseau test multi générateurs

Les figures 14 à 19 nous montrent une comparaison entre des variables réelles et des variables estimées. Au début du court-circuit, l'observateur essaye de suivre l'évolution du réseau électrique et après le court-circuit le comportement du modèle et du réseau sont identiques. Nous constatons que l'erreur entre les variables réelles et estimées converge vers zéro. Ce qui nous permet de conclure que le modèle obtenu est très proche du réseau électrique.

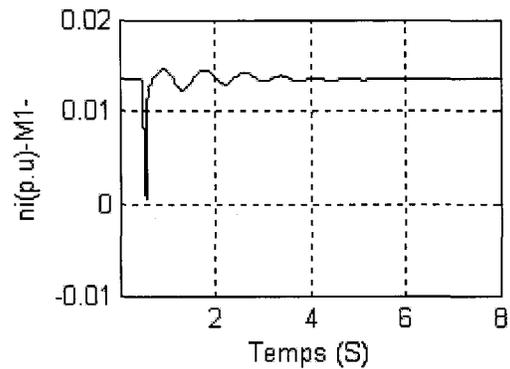
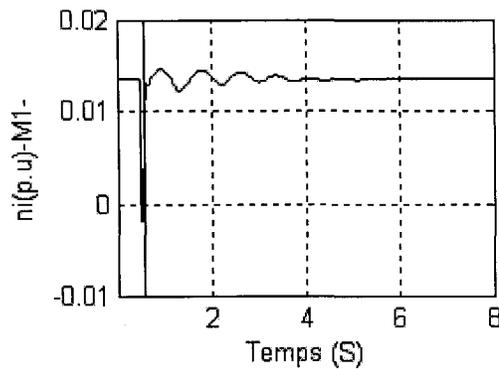


Figure 14 La variable d'état η_i réelle Figure 15 La variable d'état $\hat{\eta}_i$ estimée

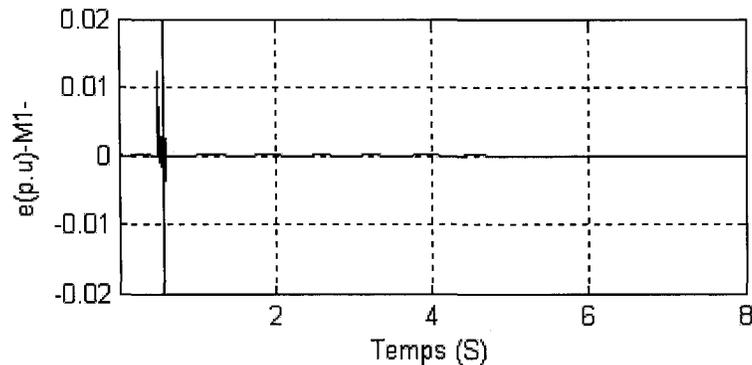
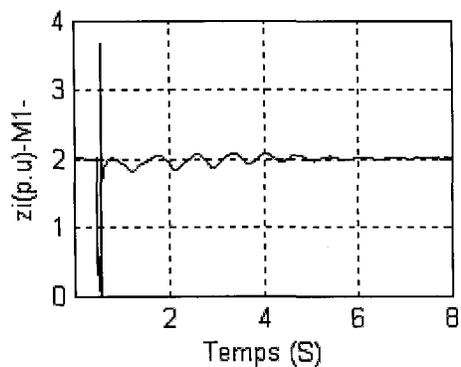
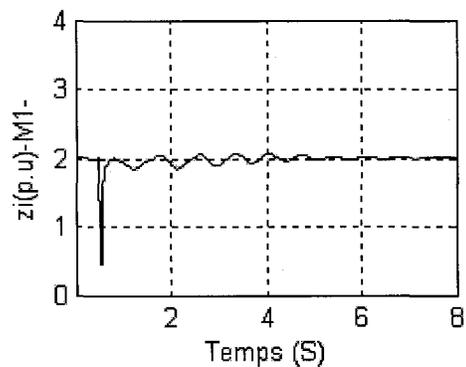
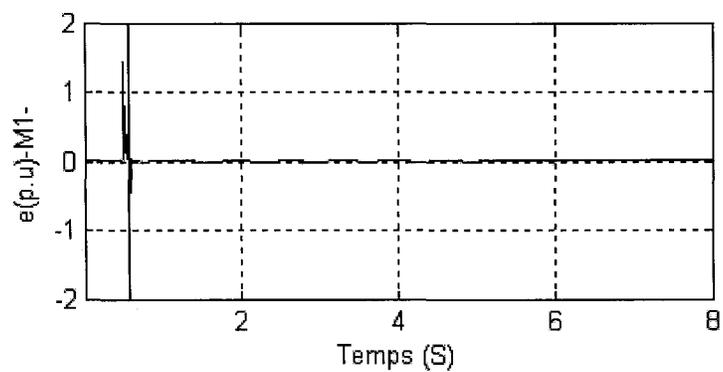


Figure 16 L'erreur (e) entre η_i réelle et $\hat{\eta}_i$ estimée

Figure 17 La variable d'état z_i réelleFigure 18 La variable d'état \hat{z}_i estiméeFigure 19 L'erreur (e) entre z_i réelle et \hat{z}_i estimée

3.4 Conception du contrôleur global linéaire

Cette section traite de la conception du contrôleur global linéaire. Pour cela une définition générale de la commande globale s'avère nécessaire. Elle va nous permettre de donner plus de détails sur cette nouvelle approche de commande et sur l'existence des délais dans cette commande. Cette définition sera suivie par l'établissement des équations du contrôleur.

3.4.1 Définition de la commande globale

Les régulateurs conventionnels des réseaux électriques ne permettent pas toujours de garantir à eux seuls la stabilité de ces derniers advenant des perturbations assez sévères. Une structure hiérarchisée à deux niveaux composée des régulateurs locaux au premier niveau et d'un régulateur global (central) au deuxième niveau a été proposée dans [7] pour augmenter l'efficacité des contrôleurs locaux et améliorer la stabilité du réseau. Le régulateur global permet d'éliminer ou d'atténuer les interactions (perturbations) entre les générateurs en découplant chaque générateur du réseau par rapport aux autres générateurs. L'élimination de ces perturbations va permettre d'augmenter la performance des régulateurs locaux, d'amortir les oscillations inter zones et donc d'augmenter la stabilité globale du réseau électrique.

La figure 20 représente le schéma descriptif de la commande globale dans un réseau électrique comportant quatre générateurs. Ce réseau est composé de deux zones, la première zone comporte trois générateurs G_1, G_2, G_3 et la deuxième zone un seul générateur G_4 . Le contrôleur global permet à partir des mesures provenant des différents générateurs de construire une commande globale qui va agir en même temps que la commande locale de chaque générateur.

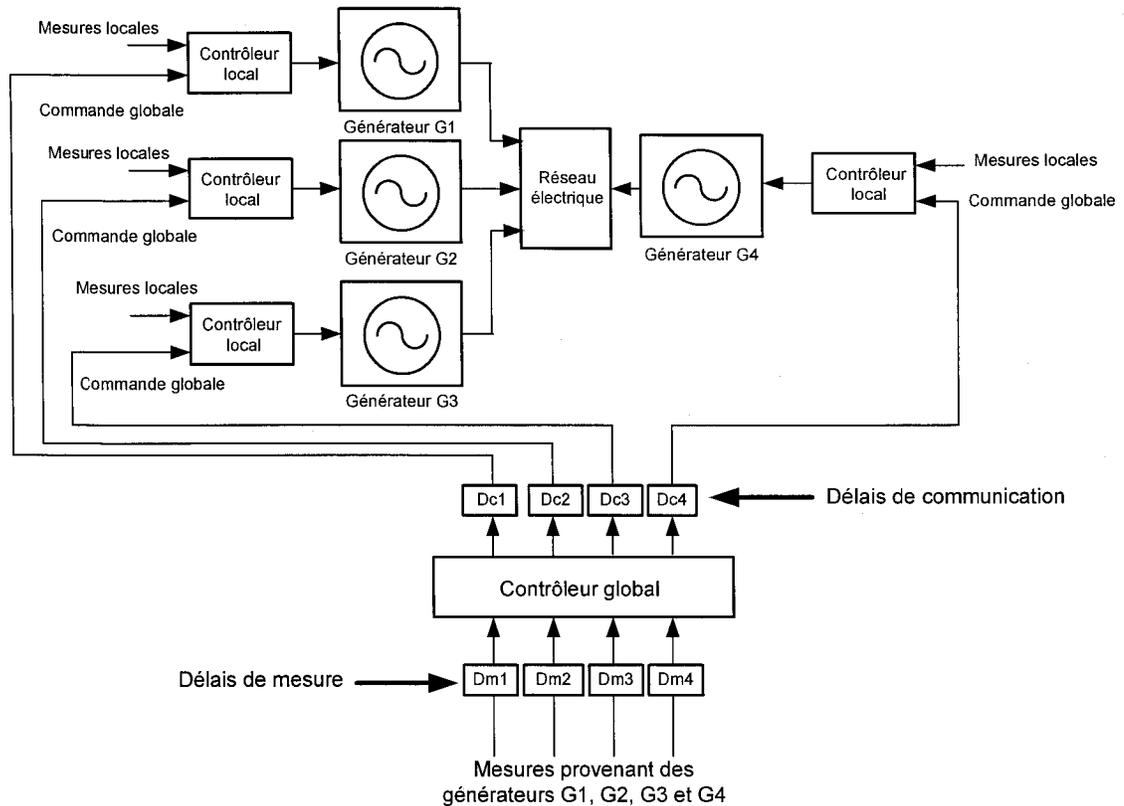


Figure 20 Structure de la commande hiérarchisée

La commande globale (hiérarchisée) ne peut être abordée sans prendre en considération l'effet des délais de mesure et de communication. Comme nous montre la figure 20, les délais interviennent de deux manières. Premièrement, le délai de mesure qui comporte le temps de calcul des différentes variables provenant des générateurs comme par exemple les tensions et les angles de charge. Deuxièmement, le délai de communication (délai de commande) qui comporte le temps de l'application de la commande globale sur les générateurs. Ce dernier délai est causé surtout par le moyen utilisé pour la communication entre le contrôleur global et les contrôleurs locaux et la distance qui les sépare. Pour bien comprendre la nature des délais, il est important de comprendre comment s'effectuent les mesures provenant des différents générateurs et par quel moyen se fait la communication inter régulateurs (communication entre le régulateur

global et les régulateurs locaux). Ce qui nous amène à introduire une nouvelle terminologie qui est l'unité de mesure de phaseurs PMU (phasor measurement unit).

Le PMU est un instrument de mesure qui est apparu dans les années 90. Il est caractérisé par sa capacité de fournir des mesures synchronisées de phaseurs de tension et de courant dans des endroits largement dispersés [20]. Il permet de donner des informations importantes sur le réseau électrique en temps réel ce qui n'est pas le cas lorsque les mesures sont fournies par les moyens traditionnels. Plusieurs entreprises ont manifesté l'intérêt pour l'utilisation des PMU comme American Electric Power, Électricité de France (EDF) et Hydro-Québec. Cet intérêt a été concrétisé par quelques recherches sur l'efficacité de l'utilisation de l'unité de mesure de phaseurs dans l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques [11], [22] et [23].

La commande globale basée sur les mesures à la grandeur du réseau a bénéficié de la technologie du PMU, la figure 21 illustre un exemple de l'utilisation d'une unité de mesure de phaseurs dans une commande globale. Le PMU permet de transmettre les informations en temps réel au contrôleur global. Ce dernier permet à partir de ces signaux de calculer les variables de commande globale requises dans notre application.

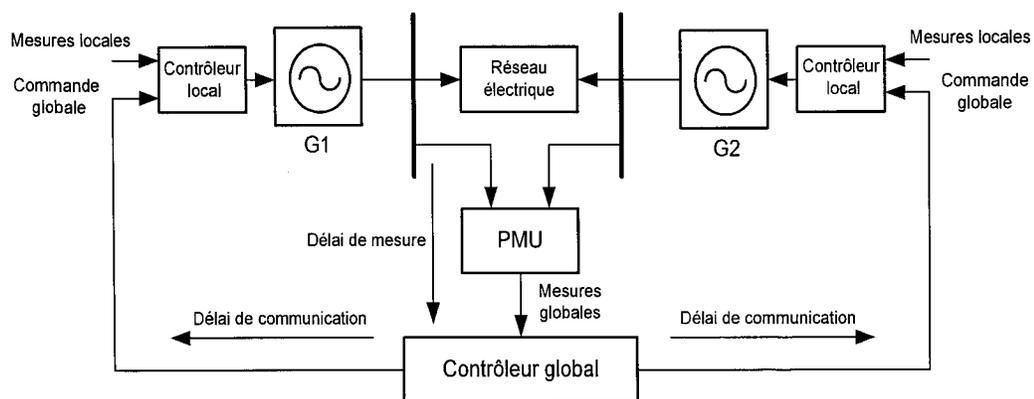


Figure 21 Exemple d'utilisation d'un PMU dans un réseau électrique

Le délai de communication inter régulateurs est essentiellement causé par :

- a. La distance qui sépare les régulateurs locaux du régulateur global (central).
- b. La nature des moyens de communication utilisés (lignes électriques, fibres optiques, micro-ondes...)

Le délai de mesure comporte :

- a. Le temps de calcul des variables (pour qu'elles soient prêtes à la sortie du PMU)
- b. Le temps de communication entre le PMU et le contrôleur central

Le tableau I nous donne les délais associés aux différents moyens de communication (lignes électriques, micro-ondes, lignes téléphoniques, fibres optiques et satellites) pour une seule voie [19]. Dans le domaine des réseaux électriques, les fibres optiques sont le moyen le plus utilisé et le délai correspondant varie de 100ms à 200ms pour une seule voie. C'est-à-dire un délai total qui varie de 200ms à 400ms dans les deux voies (délai de mesure plus délai de communication inter régulateurs).

Tableau I

Délais associés aux différents moyens de communication

Moyen de communication	Délai associé (une seule voie)
Fibres optiques	100ms-200ms
Micro-ondes	100ms-150ms
Lignes électriques	150ms-350ms
Lignes téléphoniques	200ms-300ms
Satellites	500ms-700ms

Ces dernières années, de nouvelles recherches ont été effectuées pour améliorer la performance du PMU lors de son utilisation dans les réseaux électriques. Ce qui a permis d'introduire d'autres types comme le SPM (Synchronized phasor measurement) et le PMU synchronisé par GPS (Global positioning system) [21]. L'efficacité de ces nouveaux PMU est meilleure mais leur utilisation est compromise par leurs coûts élevés.

3.4.2 Équations du contrôleur global sans délai

Le modèle global linéaire du réseau électrique permet de bien distinguer les interactions entre tous les générateurs du réseau. La dynamique de chaque générateur est fonction des variables locales et des variables globales des autres générateurs. Ainsi la loi de commande de chaque générateur est composée d'une commande locale propre pour chaque générateur et d'une commande globale qui va éliminer les interactions. Le rôle du contrôleur global est de découpler les générateurs du réseau de telle sorte que le fonctionnement de chaque générateur ne dépend que des variables locales.

Chaque générateur du réseau électrique a pour commande l'excitation E_{fdi} et la commande du servomoteur de la turbine P_{svi} . Le principe de la commande globale utilisée dans [7] est de décomposer les entrées de commande en termes locaux (E_{fdi}^l et P_{svi}^l) qui représentent la sortie du régulateur local et en termes globaux (E_{fdi}^g et P_{svi}^g) qui proviennent du régulateur global (figure 22).

$$E_{fdi} = E_{fdi}^l + E_{fdi}^g \quad (3.71)$$

$$P_{svi} = P_{svi}^l + P_{svi}^g \quad (3.72)$$

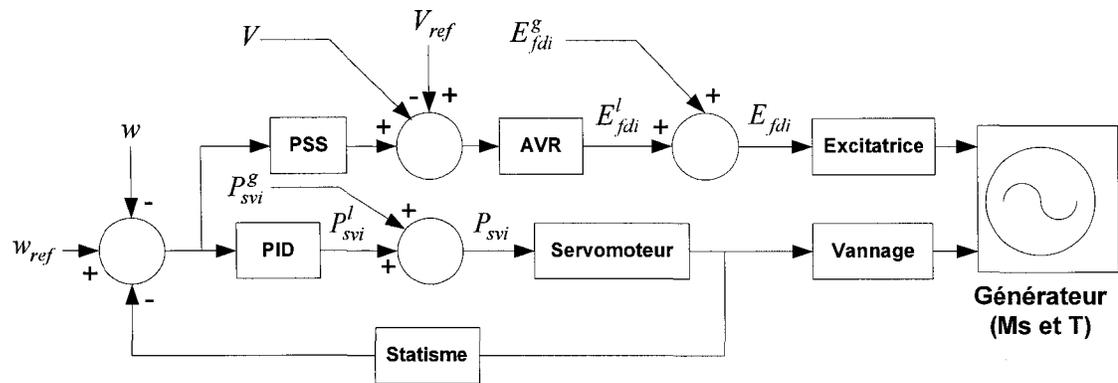


Figure 22 Contrôleur local avec signaux du contrôleur global

Notre but est de calculer les nouvelles commandes E_{fdi}^g et P_{svi}^g afin d'éliminer les interactions entre les différents générateurs du réseau. Une fois les interactions éliminées, nous obtenons une dynamique de la tension et de la vitesse de rotation du rotor qui dépend seulement des paramètres locaux du générateur i indépendamment des autres générateurs k . Ce découplage permet d'augmenter la performance des régulateurs locaux et par conséquent d'améliorer la stabilité globale du réseau électrique.

Les équations du contrôleur consistent à trouver les lois de commande globale de l'excitation E_{fdi}^g et du servomoteur P_{svi}^g . En premier lieu, nous allons déterminer les dynamiques de la tension et de la vitesse du rotor et puis nous procédons à leur dérivation jusqu'à l'apparition de l'entrée de commande.

La première sortie du système linéaire est l'erreur sur la tension :

$$\Delta y_{li} = Z_i \quad (3.73)$$

La première dérivée nous donne :

$$\dot{Z}_i = T_{1i}\eta_i + T_{2i}Z_i + T_{3i}E_{fdi} + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik}\eta_k + T_{5ik}Z_k + T_{6ik}\Delta X_{3k} + T_{7ik}\dot{\eta}_k + T_{8ik}\dot{Z}_k) \quad (3.74)$$

La commande de l'excitatrice E_{fdi} est décomposée en un terme local E_{fdi}^l et un terme global E_{fdi}^g :

$$E_{fdi} = E_{fdi}^l + E_{fdi}^g \quad (3.75)$$

Nous remplaçons E_{fdi} dans l'équation (3.74), ce qui nous donne :

$$\dot{Z}_i = T_{1i}\eta_i + T_{2i}Z_i + T_{3i}E_{fdi}^l + T_{3i}E_{fdi}^g + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik}\eta_k + T_{5ik}Z_k + T_{6ik}\Delta X_{3k} + T_{7ik}\dot{\eta}_k + T_{8ik}\dot{Z}_k) \quad (3.76)$$

Pour annuler les interactions dues aux autres générateurs (les termes qui sont fonction de k à l'intérieur de la sommation) nous allons choisir la commande globale E_{fdi}^g comme suit :

$$E_{fdi}^g = - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik}\eta_k + T_{5ik}Z_k + T_{6ik}\Delta X_{3k} + T_{7ik}\dot{\eta}_k + T_{8ik}\dot{Z}_k) / T_{3i} \quad (3.77)$$

La dynamique restante est alors :

$$\dot{Z}_i = T_{1i}\eta_i + T_{2i}Z_i + T_{3i}E_{fdi}^l \quad (3.78)$$

D'après l'équation (3.78), nous constatons que la nouvelle dynamique dépend seulement des variables locales de chaque générateur i et que les variables globales k dues aux autres générateurs sont éliminées.

Même chose pour le calcul de la commande globale du servomoteur P_{SVi}^g , nous introduisons la deuxième sortie du système qui est l'erreur sur la vitesse de rotation du rotor :

$$\Delta y_{2i} = w_i - w_S \quad (3.79)$$

La première dérivée de Δy_{2i} nous donne :

$$\Delta \dot{y}_{2i} = \frac{dw_i}{dt} = \left[T_{Mi} - R_{1i} \eta_i - (R_{2i} + G_{ii}^f) Z_i - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \eta_k + R_{4ik} Z_k + R_{5ik} \Delta X_{3k}) \right] \frac{w_s}{2H_i} \quad (3.80)$$

Nous avons aussi l'équation du couple mécanique :

$$T_{RHi} \dot{T}_{Mi} = -T_{Mi} + \left(1 - \frac{K_{HPi} T_{RHi}}{T_{CHI}}\right) P_{CHi} + \left(\frac{K_{HPi} T_{RHi}}{T_{CHI}}\right) P_{SVi} \quad (3.81)$$

La deuxième dérivée de Δy_{2i} a la forme suivante :

$$\Delta \ddot{y}_{2i} = \left[\dot{T}_{Mi} - R_{1i} \dot{\eta}_i - (R_{2i} + G_{ii}^f) \dot{Z}_i - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k + R_{4ik} \dot{Z}_k + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}) \right] \frac{w_s}{2H_i} \quad (3.82)$$

La commande du servomoteur P_{SVi} est décomposée aussi en un terme local P_{SVi}^l et un terme global P_{SVi}^g :

$$P_{SVi} = P_{SVi}^l + P_{SVi}^g \quad (3.83)$$

Nous remplaçons \dot{T}_{Mi} par sa valeur dans (3.82), ce qui nous donne :

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{y}_{2i} = & \left[-\frac{1}{T_{RH_i}} T_{Mi} + \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) P_{CH_i} + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P_{PSV_i}^l - R_{1i} \dot{\eta}_i - (R_{2i} + G_{ii}^f) \dot{Z}_i + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P_{PSV_i}^g \right. \\ & \left. - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k + R_{4ik} \dot{Z}_{ik} + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}) \right] \frac{w_S}{2H_i} \end{aligned} \quad (3.84)$$

Pour annuler les interactions dues aux autres générateurs, nous allons choisir notre commande globale comme suit :

$$P_{PSV_i}^g = \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k + R_{4ik} \dot{Z}_{ik} + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}) \frac{T_{CH_i}}{K_{HP_i}} \quad (3.85)$$

La dynamique restante est alors :

$$\Delta \ddot{y}_{2i} = \left[-\frac{1}{T_{RH_i}} T_{Mi} + \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) P_{CH_i} + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P_{PSV_i}^l - R_{1i} \dot{\eta}_i - (R_{2i} + G_{ii}^f) \dot{Z}_i \right] \frac{w_S}{2H_i} \quad (3.86)$$

La nouvelle dynamique représentée par l'équation (3.86) dépend seulement des variables locales de chaque générateur i et les variables globales k dues aux autres générateurs sont éliminées.

Alors nous avons calculé deux lois de commandes (3.87) et (3.88), ces deux lois vont nous permettre de découpler les générateurs en supprimant les interactions entre les générateurs du réseau électrique.

$$E_{jdi}^g = - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik} \eta_k + T_{5ik} Z_k + T_{6ik} \Delta X_{3k} + T_{7ik} \dot{\eta}_k + T_{8ik} \dot{Z}_k) / T_{3i} \quad (3.87)$$

$$P_{PSVi}^g = \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k + R_{4ik} \dot{Z}_{ik} + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}) \frac{T_{CHi}}{K_{HPi}} \quad (3.88)$$

Après l'établissement des équations du contrôleur global linéaire, le prochain chapitre traite l'application et les tests de validation de ce contrôleur sur un réseau électrique multi générateurs.

CHAPITRE 4

TESTS DE VALIDATION DU CONTRÔLEUR GLOBAL

Dans ce chapitre nous allons valider par simulation l'efficacité de la commande globale, c'est-à-dire nous assurer que cette commande augmente vraiment la performance des régulateurs locaux et diminue les oscillations inter zones. Cette performance sera jugée par l'amélioration du régime transitoire et la diminution du temps de réponse des sorties du réseau. À cet effet, nous allons effectuer une série de tests qui consistent principalement en un court-circuit triphasé à la barre des générateurs G_1, G_2 et G_3 , un court-circuit triphasé sur la ligne de transport sans perte de la ligne et un court-circuit triphasé sur cette même ligne avec ouverture de la ligne. Pour réaliser ces tests, nous allons utiliser le logiciel SymPowerSystems (SPS) de Matlab et faire l'application sur le réseau électrique illustré à la figure 23.

4.1 Description du réseau test

Le réseau électrique représenté dans la figure 23 est inspiré de celui d'Hydro-Québec, il comporte deux zones liées par des lignes et des transformateurs qui alimentent des charges. La première zone est constituée de trois générateurs G_1, G_2 et G_3 tandis que la deuxième zone comprend un seul générateur G_4 . À l'équilibre les générateurs G_1, G_2, G_3 et G_4 produisent respectivement 4116MW, 1000MW, 537MW et 35000MW. Pour la simulation, nous allons utiliser un stabilisateur multi-bandes (IEEE PSSB4). Nous pouvons consulter [13] pour plus d'informations sur ce stabilisateur.

Les valeurs des paramètres des générateurs ainsi qu'un exemple des régulateurs conventionnels (régulateur de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur de puissance) sont présentés dans l'annexe 3.

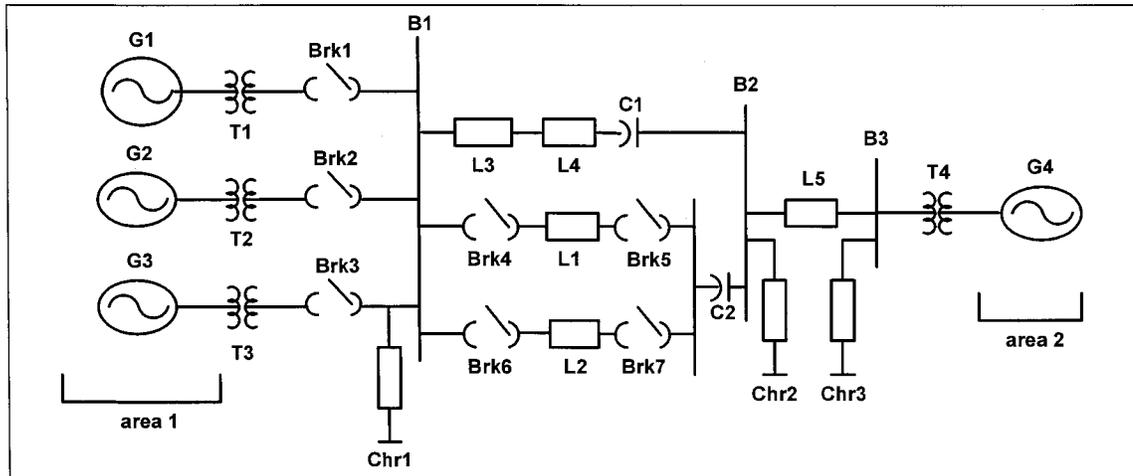


Figure 23 Réseau électrique multi générateurs

4.2 Tests de simulation

Nous allons effectuer différents tests de simulation et vérifier l'efficacité de la commande globale sur la performance des régulateurs locaux et l'amortissement des oscillations inter zones.

4.2.1 Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1

Le premier test est un court-circuit triphasé de quatre cycles appliqué à la barre B1. Le court-circuit interrompt le transfert de puissance entre les deux zones ce qui donne une fluctuation de la puissance transitée dans le réseau. Cette dernière se mesure par une variation dans le temps des tensions et des fréquences des générateurs. Les figures 24 à 29 représentent le comportement de quelques variables dynamiques (l'excitation, la puissance mécanique, l'ouverture du vannage et l'angle de charge) pour différents générateurs en présence du contrôleur global. Nous remarquons une variation de ces variables après la perturbation et elles se stabilisent après au moins 3 secondes.

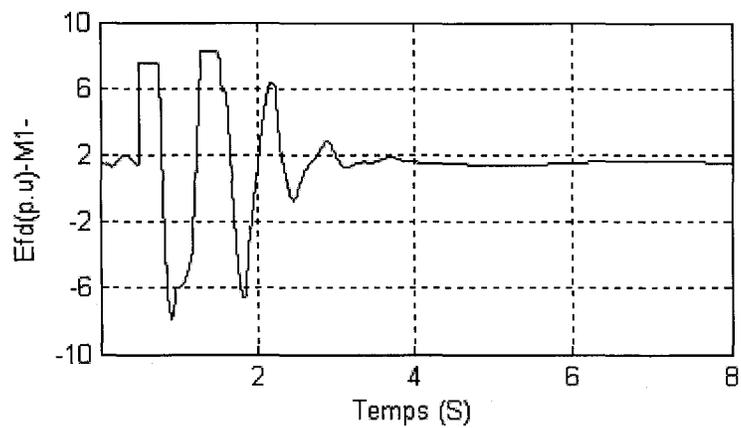


Figure 24 Excitation de G1 après un court-circuit à la barre B1

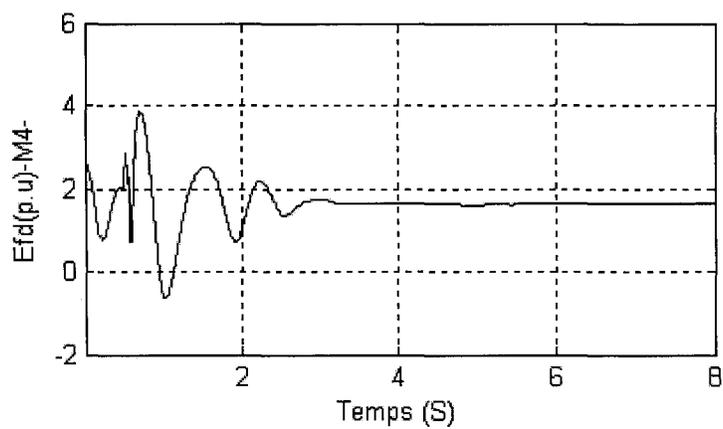


Figure 25 Excitation de G4 après un court-circuit à la barre B1

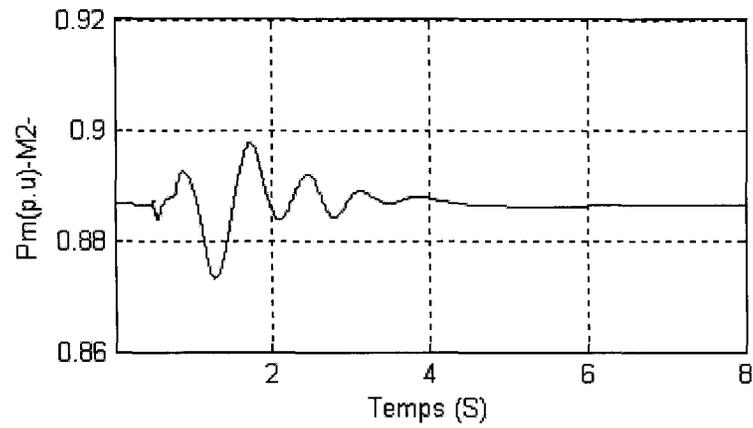


Figure 26 Puissance mécanique de G2 après un court-circuit à la barre B1

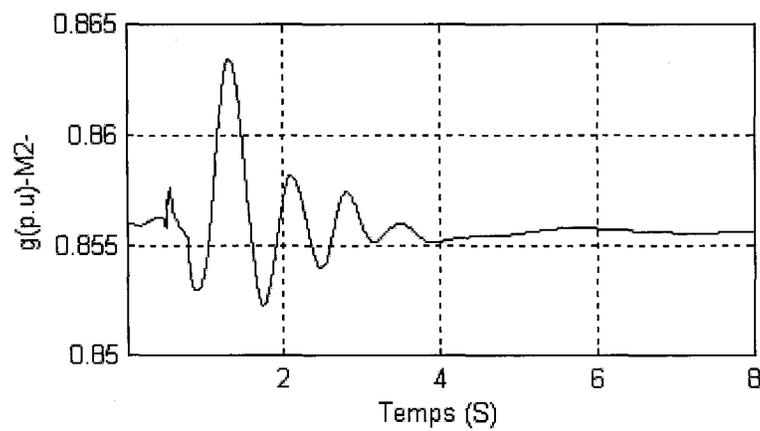


Figure 27 Vannage de G2 après un court-circuit à la barre B1

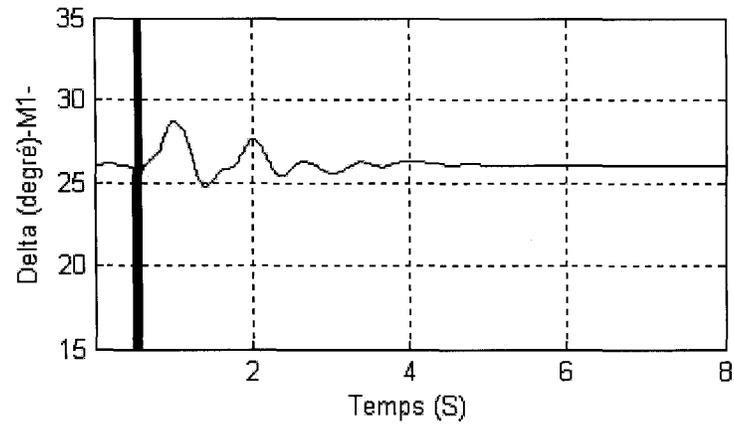


Figure 28 Angle de charge de G1 après un court-circuit à la barre B1

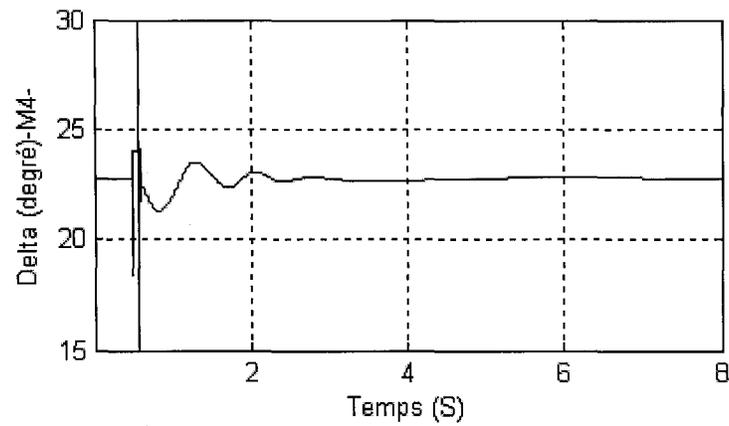


Figure 29 Angle de charge de G4 après un court-circuit à la barre B1

Les figures suivantes 30 à 33 montrent la comparaison de la vitesse du rotor et de la tension terminale obtenues avec le régulateur global et celles du régulateur local (conventionnel). Avec le régulateur global la vitesse et la tension se stabilisent à la valeur d'équilibre (1 p.u) après 3 secondes. Le régulateur global amortit plus efficacement les oscillations. Il converge plus rapidement que le régulateur local.

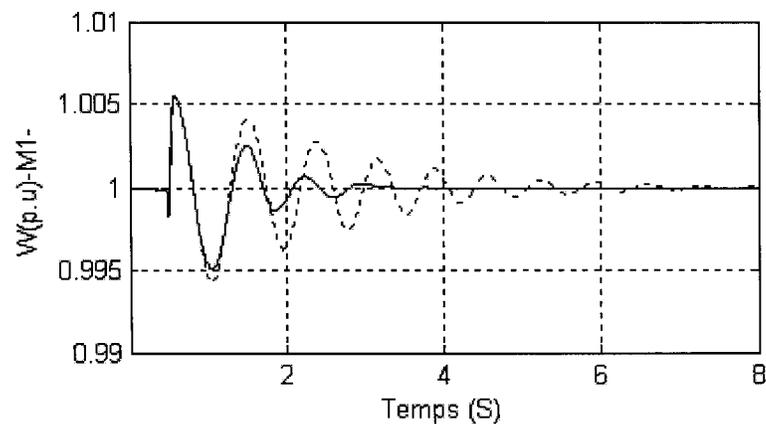


Figure 30 Vitesse de G1 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

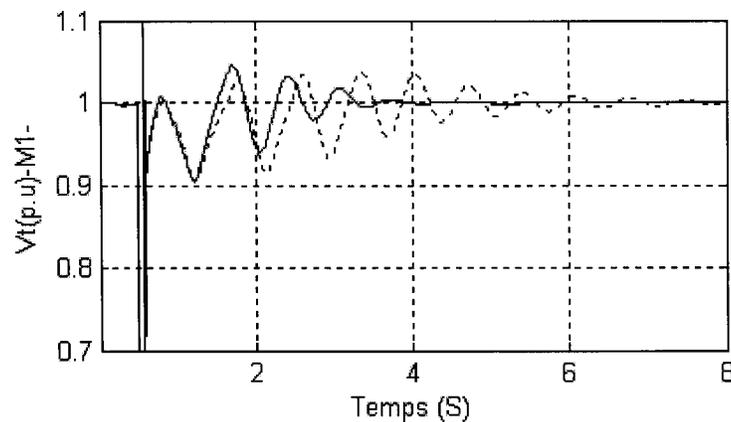


Figure 31 Tension de G1 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

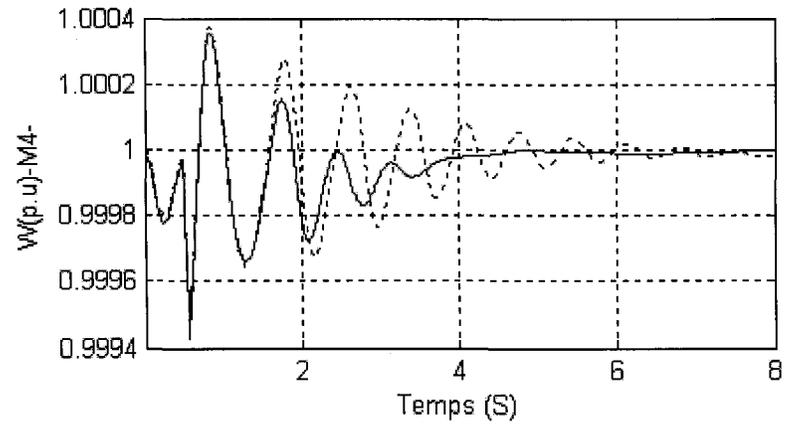


Figure 32 Vitesse de G4 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

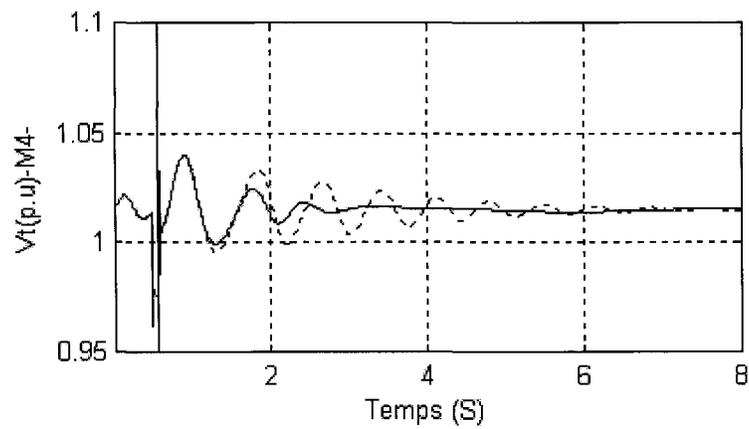


Figure 33 Tension de G4 après un court-circuit de 4 cycles à la barre B1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

4.2.2 Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1 et ouverture de la ligne L1

Le deuxième test est un court-circuit triphasé de quatre cycles appliqué à la barre B1 suivi de l'ouverture de la ligne L1 (disjoncteurs Brk4 et Brk5) après un cycle du début du court-circuit.

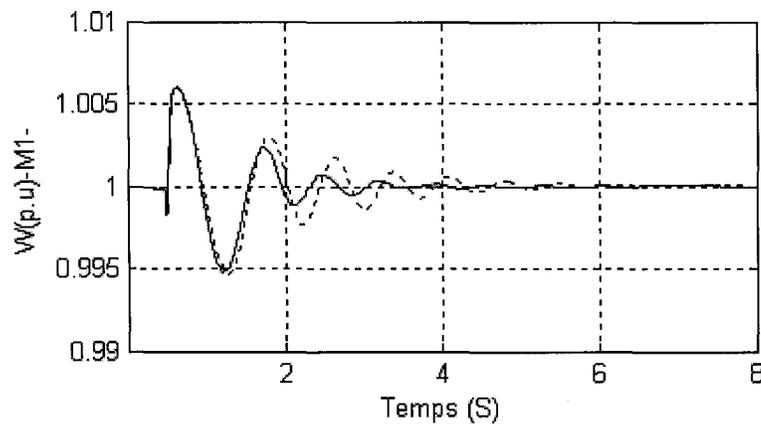


Figure 34 Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

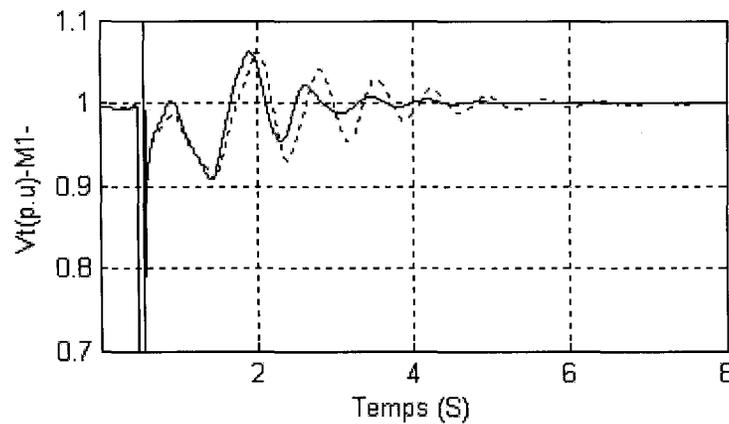


Figure 35 Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

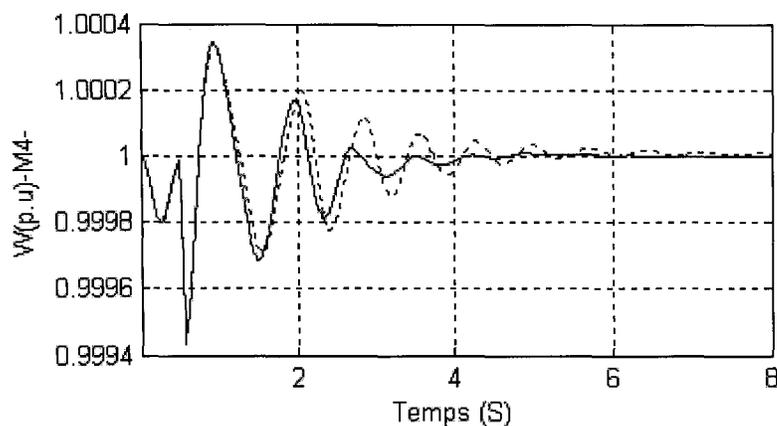


Figure 36 Vitesse de G4 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

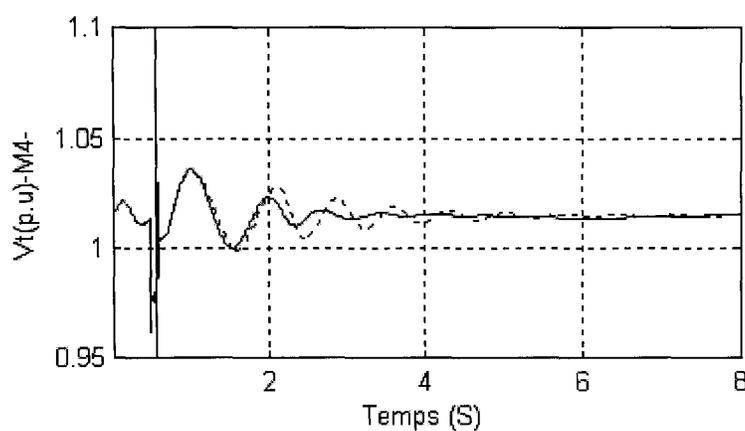


Figure 37 Tension de G4 court-circuit à la barre B1 et ouverture de L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

L'ouverture d'une ligne de transport diminue l'effet du court-circuit. Les oscillations locales sont moins grandes. Dans ce cas l'efficacité du régulateur global n'est pas très apparente car l'effet du court-circuit est diminué par l'ouverture de la ligne. Mais nous constatons que les sorties du réseau (la vitesse de rotation et la tension terminale) en présence du régulateur global sont toujours meilleures que celles du régulateur local.

4.2.3 Défaut triphasé de quatre cycles sur la ligne L1

Le troisième test est un court-circuit triphasé de quatre cycles sur la ligne L1. Ce court-circuit est plus sévère que celui effectué sur la barre B1 et les oscillations locales sont plus grandes.

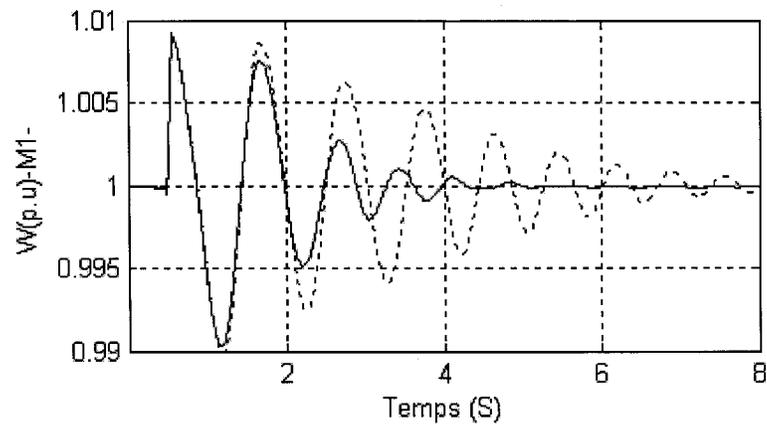


Figure 38 Vitesse de G1 après un court-circuit de 4 cycles sur la ligne L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

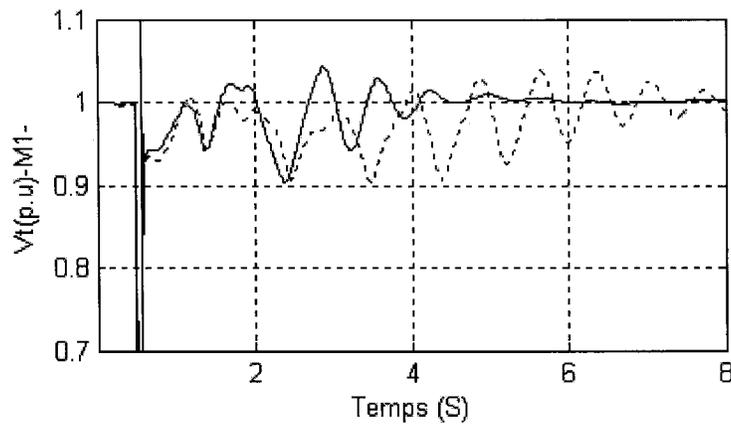


Figure 39 Tension de G1 après un court-circuit de 4 cycles sur la ligne L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

4.2.4 Défaut triphasé de cinq cycles sur la ligne L1

Le quatrième test est un court-circuit triphasé de cinq cycles sur la ligne L1. La durée du cycle dépasse la limite de la stabilité du réseau électrique. Nous allons étudier le comportement du régulateur global face à cette augmentation de la durée du court-circuit.

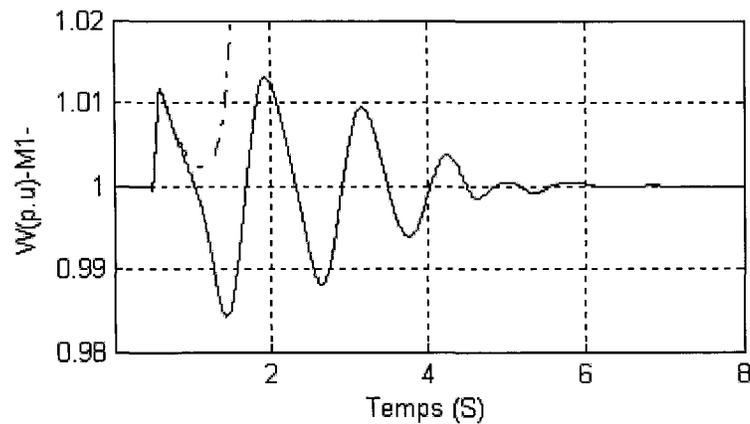


Figure 40 Vitesse de G1 après un court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

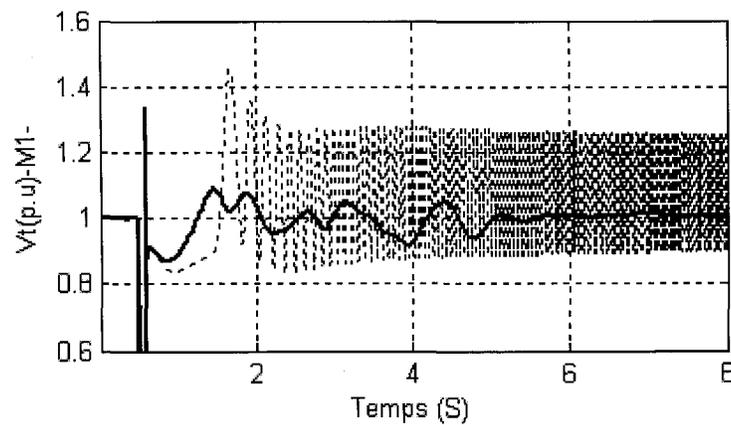


Figure 41 Tension de G1 après un court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

4.2.5 Défaut triphasé de cinq cycles à la barre B1 et ouverture des lignes L1 et L2

Le cinquième test est plus sévère que tous les tests précédents. Il consiste à un court-circuit triphasé de cinq cycles à la barre B1 et ouverture des lignes L1 et L2 après un cycle du début du court-circuit.

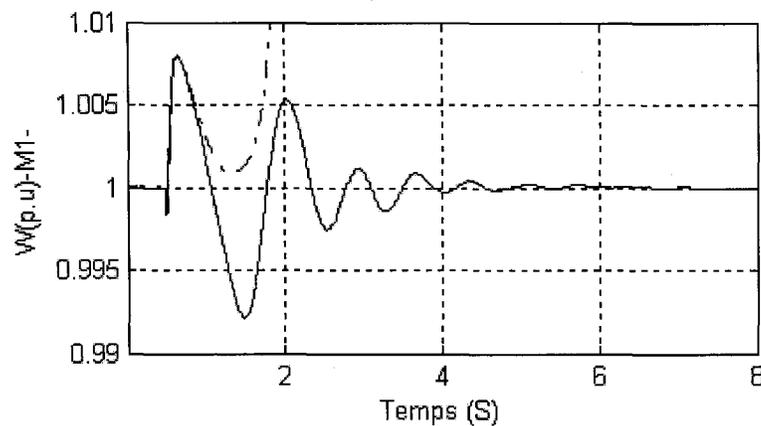


Figure 42 Vitesse de G1 court-circuit de 5 cycles et ouverture de deux lignes
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

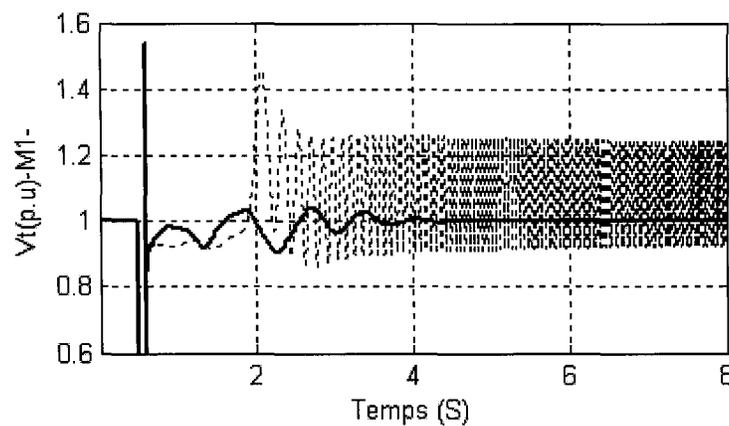


Figure 43 Tension de G1 court-circuit de 5 cycles et ouverture de deux lignes
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

Pour un court-circuit de cinq cycles (figures 40 à 43), la tension et la vitesse du réseau divergent dans le cas du régulateur local mais restent stable en présence du régulateur global. Donc dans ces deux cas, le régulateur local ne peut garantir à lui seul la stabilité du réseau électrique. En présence du régulateur global, la tension terminale et la vitesse du rotor se stabilisent après une durée de cinq secondes. Le régulateur proposé permet donc d'assurer la stabilité du réseau électrique avec l'augmentation de la limite de la stabilité.

4.2.6 Les oscillations inter zones

La plus grande performance du régulateur global est l'amortissement des oscillations inter zones. Cette performance est illustrée dans les figures suivantes pour différents tests. Pour un court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1 (Figure 44), le régulateur global est plus efficace que le régulateur local dans l'amortissement des oscillations inter zones. Même remarque pour un court-circuit triphasé de quatre cycles avec ouverture de la ligne L1, le résultat obtenu (Figure 45) atteste l'efficacité du contrôleur global dans l'amortissement des oscillations inter zones.

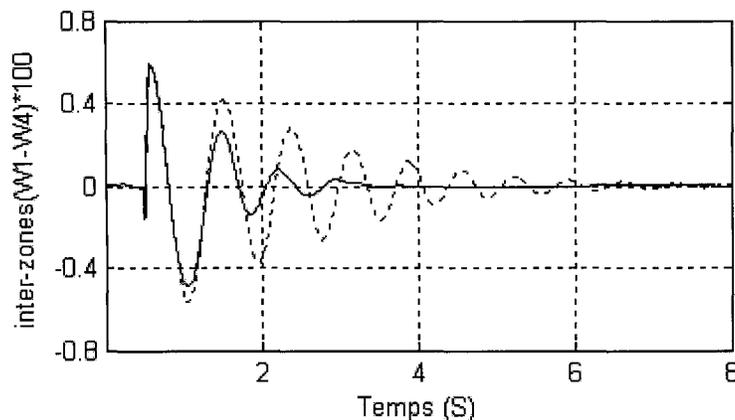


Figure 44 Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles à la barre B1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

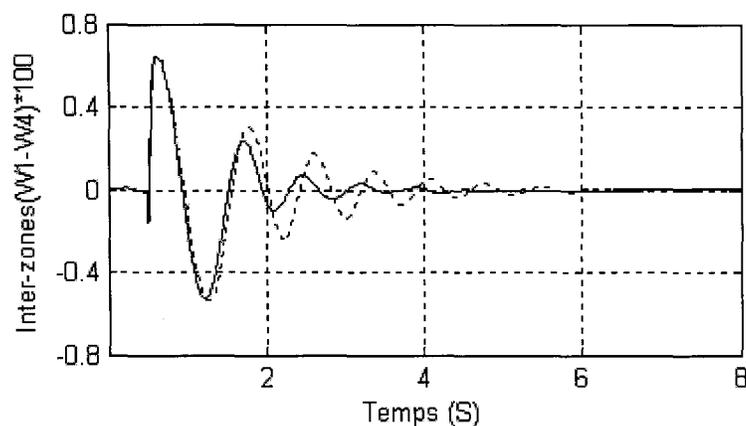


Figure 45 Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles et ouverture de L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

La figure 46 illustre les oscillations inter zones dans le cas où le contrôleur local (conventionnel) est instable (court-circuit triphasé de cinq cycles sur la ligne L1). Les oscillations inter zones sont amorties par le contrôleur global qui rend le réseau stable. Le contrôleur proposé permet de maintenir le synchronisme entre les différentes zones du réseau électrique.

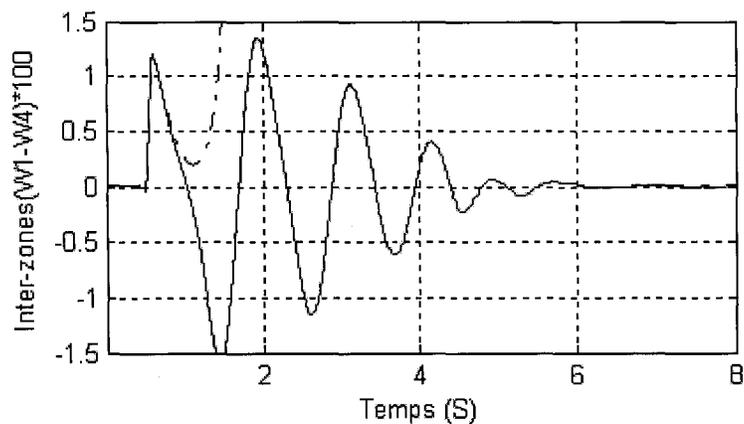


Figure 46 Oscillations interzones court-circuit de 5 cycles sur la ligne L1
Discontinu : régulateur local, Continu : régulateur global

4.3 Conclusion

La performance du régulateur global comparativement au régulateur local est meilleure. Le régulateur global améliore la performance des régulateurs locaux, il diminue la vitesse de réponse et améliore le régime transitoire. Il atténue de façon plus importante les oscillations inter zones. La commande globale permet donc un bon fonctionnement et une stabilité globale du réseau électrique. Le réseau peut résister à de plus fortes perturbations sans perdre le synchronisme.

Les résultats de simulation attestent que cette nouvelle méthode de conception d'un régulateur global linéaire est valide. Cette dernière donne une bonne performance face aux oscillations inter zones et augmente la performance de l'ensemble (régulateur de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur de puissance). Ses résultats sont proches de ceux trouvés dans [7] pour la commande globale non linéaire.

4.4 Effets du délai sur la performance du contrôleur global

Tous les résultats trouvés ci-dessus ont été obtenus sans tenir compte des délais. Le contrôleur global perd de sa robustesse et sa performance se détériore fortement quand les délais ne sont pas négligés. Avant d'introduire la notion de compensation, nous allons étudier l'impact du délai sur la performance du contrôleur global. Comme nous avons illustré précédemment, ce délai intervient dans les mesures entre les générateurs et le contrôleur global et aussi dans les signaux de communication inter régulateurs. Pour effectuer ce test, nous allons prendre quelques valeurs de délai en nous basons sur le type du moyen de communication (entre le régulateur global et les régulateurs locaux). Dans notre cas nous étudierons l'exemple des fibres optiques qui est le moyen de communication le plus fréquent dans le domaine des réseaux électriques. Pour les fibres optiques, le délai varie en moyenne entre 100ms et 200ms pour une seule voie et au total

entre 200ms et 400ms. Notons qu'une seule voie correspond soit au délai de mesure ou de communication inter régulateurs.

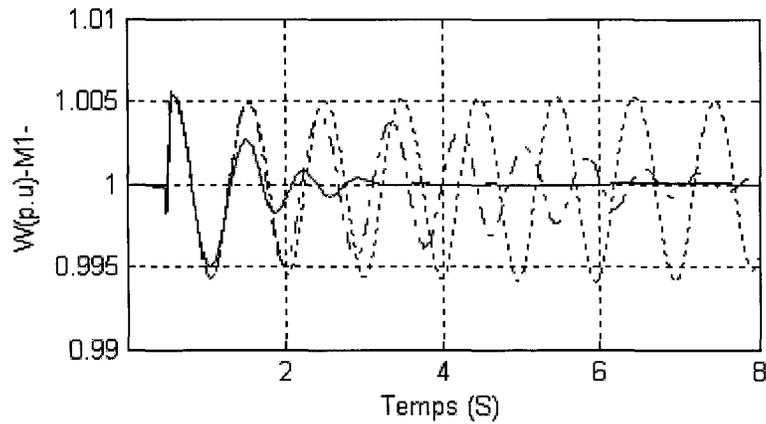


Figure 47 Vitesse de G1 après un court-circuit avec différents délais

--- délai de 300ms
 délai de 400ms
 — sans délai

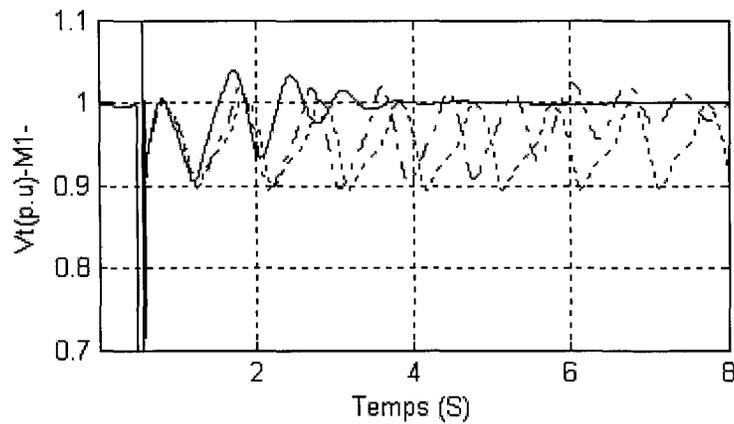


Figure 48 Tension de G1 après un court-circuit avec différents délais

--- délai de 300ms
 délai de 400ms
 — sans délai

Les figures 47 et 48 nous montrent l'effet du délai sur les sorties (la tension terminale et la vitesse de rotation) d'un générateur du réseau électrique. Quand le délai augmente, la performance du régulateur global (régulateur proposé) se détériore et le réseau électrique devient instable. Alors pour recouvrer la performance du cas sans délai, nous proposons une méthode de compensation des délais basée sur le prédicteur de Smith. Cette méthode est traitée en détail dans le dernier chapitre.

CHAPITRE 5

COMPENSATION DES DÉLAIS PAR LE PRÉDICTEUR DE SMITH

5.1 Introduction

La structure hiérarchisée composée des contrôleurs conventionnels au premier niveau et d'un contrôleur global au niveau deux a permis d'améliorer la performance des régulateurs conventionnels et la stabilité du réseau électrique. De très bonnes performances ont été obtenues quand les délais sont négligés. Cependant l'existence du délai causé par les distances qui séparent les différents composants du réseau, le moyen de communication entre les régulateurs et le temps de mesure détériore considérablement l'efficacité du contrôleur global et le réseau électrique perd sa stabilité. Récemment quelques travaux de recherche ont été effectués pour compenser le délai dans une commande hiérarchisée de réseaux électriques. Ni [15] a décrit le délai par l'approximation de Padé et Chaudhuri [16] a utilisé un contrôleur basé sur la théorie de H_∞ et un prédicteur de Smith unifié (USP). Wu [17] et Heydt [18] ont proposé une méthode du séquençement de gains (gain scheduling) basée sur la théorie des inégalités linéaires de matrice (LMI) pour compenser le délai. Dans notre étude, la méthode de compensation utilisée est basée sur la version multivariable linéaire du prédicteur de Smith pour le cas de deux délais (délais de mesure et de commande).

Dans ce chapitre, nous allons faire un bref rappel sur le principe de la méthode classique du prédicteur de Smith. Nous allons ensuite présenter l'existence des délais dans les équations du contrôleur global. Nous appliquons la prédiction par l'adaptation de ce prédicteur sur notre travail. Enfin, nous procédons à la validation du contrôleur basé sur le prédicteur de Smith pour des délais de mesure et de communication différents. Nous terminons par une interprétation des différents résultats obtenus et une conclusion.

5.2 Rappel sur le prédicteur de Smith

La présence du délai dans une boucle de régulation conventionnelle (figure 49) affecte sérieusement l'efficacité et la stabilité de cette dernière. Ce délai ne peut pas être éliminé directement de cette boucle quelle que soit la méthode utilisée.

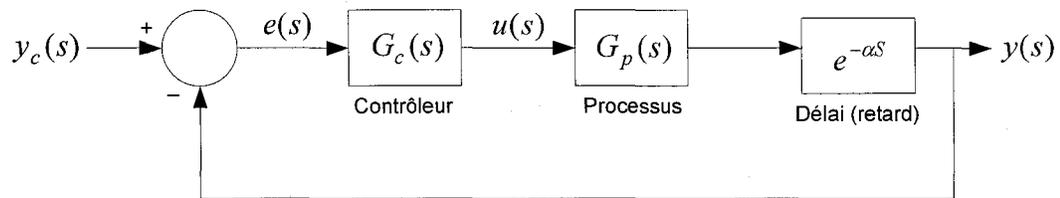


Figure 49 Boucle de régulation conventionnelle avec délai

Si nous désirons corriger le processus ayant un retard (délai) de la même façon qu'un système sans retard nous devons isoler le délai (figure 50). Mais en pratique cette solution n'est pas réalisable car ne nous pouvons pas faire des mesures sans délais.

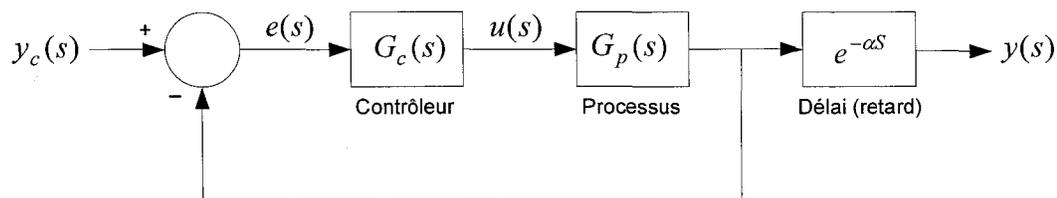


Figure 50 Boucle de régulation conventionnelle avec délai isolé

En 1957 Smith proposa une technique pour rendre la stabilité indépendante du délai pour un système de commande monovariante [14]. L'idée de base du contrôleur prédicteur de Smith est de concevoir un contrôleur $G_c(s)$ pour le processus sans retard (délai) et ensuite de calculer un contrôleur $H(s)$ adapté au processus avec retard en fonction du contrôleur réalisé auparavant. Dans le cas idéal où le système (processus) et le modèle

sont identiques la sortie $y(s)$ qui est la réponse du système avec délai sera éliminée et le contrôle sera basé sur la nouvelle sortie sans délai $y_{prédi}(s)$ (voir figure 51). Donc, la sortie $y_{prédi}(s)$ est considérée comme une prédiction de $y(s)$.

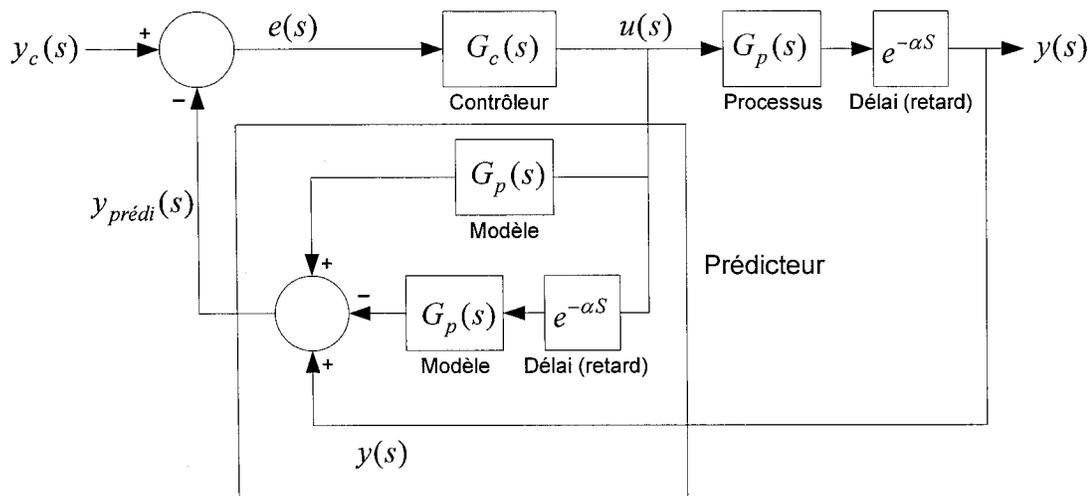


Figure 51 Principe du prédicteur de Smith

La fonction de transfert du nouveau contrôleur est :

$$H(s) = \frac{u(s)}{y_c(s)} = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)(1 - e^{-\alpha S})} \quad (5.1)$$

Nous remplaçons dans la fonction de transfert totale du système, nous trouvons :

$$\frac{y(s)}{y_c(s)} = \frac{H(s)G_p(s)e^{-\alpha S}}{1 + H(s)G_p(s)e^{-\alpha S}} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\alpha S}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (5.2)$$

$$\frac{y(s)}{y_c(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\alpha S}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (5.3)$$

Selon l'expression (5.3) l'équation caractéristique est :

$$\Delta(s) = 1 + G_c(s)G_p(s) \quad (5.4)$$

Cette équation ne dépend pas du terme de délai $e^{-\alpha s}$ c'est l'équation caractéristique du système sans délai, la stabilité est donc indépendante du délai. Le délai est éliminé de l'équation caractéristique et le contrôle se conçoit comme si le délai n'existait pas. Ce qui prouve l'efficacité du prédicteur de Smith pour la compensation d'un délai simple.

5.3 Équations du contrôleur global avec délai

Dans notre étude les délais existent de deux manières comme l'illustre la figure 52 et comme nous l'avons déjà précisé dans le chapitre 3. Premièrement, le délai de mesure entre les générateurs et le contrôleur global et deuxièmement, le délai de communication (commande) entre le contrôleur global et les régulateurs locaux.

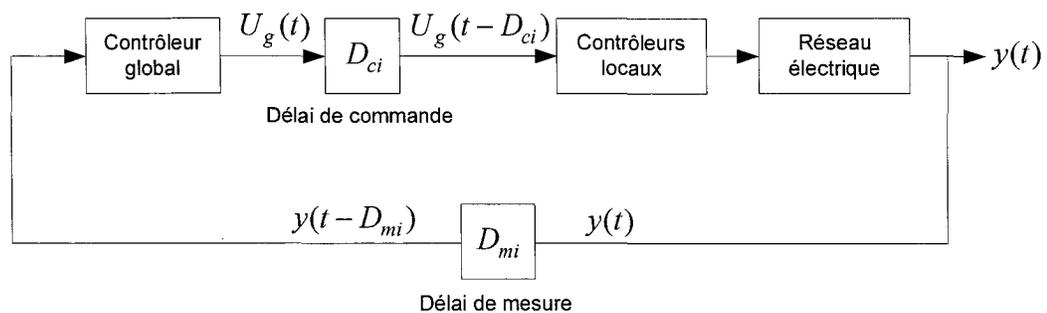


Figure 52 Existence des délais dans la commande globale

Pour une bonne compréhension de l'existence des délais dans la commande basée sur les signaux à la grandeur du réseau, nous reprenons les équations du contrôleur global élaborées dans le chapitre 3, mais nous tenons compte cette fois-ci des délais. L'existence des délais dans les équations du contrôleur global affecte considérablement sa performance et une compensation s'avère nécessaire.

Pour cela nous allons reprendre les étapes pour le calcul des équations du contrôleur global sans négliger le délai. Nous procédons à la dérivation des variables d'état de chaque générateur.

La première sortie du réseau électrique est l'erreur sur la tension terminale :

$$\Delta y_{1i} = Z_i(t - D_{mi}) \quad (5.5)$$

D_{mi} représente le délai de mesure entre le générateur i et le contrôleur global.

La première dérivée de Δy_{1i} nous donne :

$$\begin{aligned} \dot{Z}_i = & T_{1i}\eta_i(t - D_{mi}) + T_{2i}Z_i(t - D_{mi}) + T_{3i}E_{fdi}(t - D_{mi}) + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m [T_{4ik}\eta_k(t - D_{mi}) + T_{5ik}Z_k(t - D_{mi}) \\ & + T_{6ik}\Delta X_{3k}(t - D_{mi}) + T_{7ik}\dot{\eta}_k(t - D_{mi}) + T_{8ik}\dot{Z}_k(t - D_{mi})] \end{aligned} \quad (5.6)$$

La commande de l'excitatrice E_{fdi} est décomposée en un terme local E_{fdi}^l et un terme global E_{fdi}^g :

$$E_{fdi}(t) = E_{fdi}^l(t) + E_{fdi}^g(t - D_{ci}) \quad (5.7)$$

Avec D_{ci} le délai de communication (commande) entre le contrôleur global (central) et le contrôleur local du générateur i .

Nous remplaçons $E_{fdi}(t)$ dans l'équation (5.6) :

$$\begin{aligned} \dot{Z}_i = & T_{1i}\eta_i(t - D_{mi}) + T_{2i}Z_i(t - D_{mi}) + T_{3i}E_{fdi}^l(t - D_{mi}) + T_{3i}E_{fdi}^g(t - D_{ci} - D_{mi}) + \\ & \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik}\eta_k(t - D_{mi}) + T_{5ik}Z_k(t - D_{mi}) + T_{6ik}\Delta X_{3k}(t - D_{mi}) + T_{7ik}\dot{\eta}_k(t - D_{mi}) + T_{8ik}\dot{Z}_k(t - D_{mi})) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Pour annuler le terme qui contient les interactions dues aux autres générateurs nous allons choisir la commande globale comme suit :

$$E_{fdi}^g(t - D_{ci} - D_{mi}) = - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m [T_{4ik} \eta_k(t - D_{mi}) + T_{5ik} Z_k(t - D_{mi}) + T_{6ik} \Delta X_{3k}(t - D_{mi}) + T_{7ik} \dot{\eta}_k(t - D_{mi}) + T_{8ik} \dot{Z}_k(t - D_{mi})] / T_{3i} \quad (5.9)$$

Cette commande est exprimée à l'instant $(t - D_{ci} - D_{mi})$, nous allons réécrire l'expression (5.9) à l'instant (t) :

$$E_{fdi}^g(t) = - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m [T_{4ik} \eta_k(t + D_{ci}) + T_{5ik} Z_k(t + D_{ci}) + T_{6ik} \Delta X_{3k}(t + D_{ci}) + T_{7ik} \dot{\eta}_k(t + D_{ci}) + T_{8ik} \dot{Z}_k(t + D_{ci})] / T_{3i} \quad (5.10)$$

La loi de commande (5.10) ne peut être réalisée car elle dépend des variables à l'instant $(t + D_{ci})$. Pour cela, le prédicteur de Smith permet de prédire ces variables.

La dynamique restante est :

$$\dot{Z}_i = T_{1i} \eta_i(t) + T_{2i} Z_i(t) + T_{3i} E_{fdi}^l(t) \quad (5.11)$$

La nouvelle dynamique dépend seulement des variables locales de chaque générateur i .

Pour le calcul de la commande globale du servomoteur P_{svi}^g , nous introduisons la deuxième sortie du système qui est l'erreur sur la vitesse :

$$\Delta y_{2i} = \dot{\delta}_i = w_i(t - D_{mi}) - w_S \quad (5.12)$$

Après dérivation nous obtenons :

$$\Delta\dot{y}_{2i} = \frac{dw_i}{dt} = \left[T_{Mi} - R_{1i}\eta_i(t-D_{mi}) - (R_{2i} + G_{ii}^f)Z_i(t-D_{mi}) - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik}\eta_k(t-D_{mi}) + R_{4ik}Z_k(t-D_{mi})) + R_{5ik}\Delta X_{3k}(t-D_{mi}) \right] \frac{w_s}{2H_i} \quad (5.13)$$

Nous avons aussi l'expression du couple mécanique de la turbine qui est donnée par l'équation suivante :

$$T_{RHi}\dot{T}_{Mi} = -T_{Mi} + \left(1 - \frac{K_{HPi}T_{RHi}}{T_{CHI}}\right)P_{CHi} + \left(\frac{K_{HPi}T_{RHi}}{T_{CHI}}\right)P_{SVi} \quad (5.14)$$

Nous dérivons une deuxième fois Δy_{2i} :

$$\Delta\ddot{y}_{2i} = \left[\dot{T}_{Mi} - R_{1i}\dot{\eta}_i(t-D_{mi}) - (R_{2i} + G_{ii}^f)\dot{Z}_i(t-D_{mi}) - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik}\dot{\eta}_k(t-D_{mi}) + R_{4ik}\dot{Z}_k(t-D_{mi})) + R_{5ik}\Delta\dot{X}_{3k}(t-D_{mi}) \right] \frac{w_s}{2H_i} \quad (5.15)$$

La commande du servomoteur de la turbine est décomposée aussi en un terme local P_{SVi}^l et un terme global P_{SVi}^g :

$$P_{SVi}(t) = P_{SVi}^l(t) + P_{SVi}^g(t - D_{ci}) \quad (5.16)$$

Nous remplaçons \dot{T}_{Mi} dans l'équation (5.15) :

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{y}_{2i} = & \left[-\frac{1}{T_{RH_i}} T_{M_i} + \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) P_{CH_i} + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P'_{PSV_i}(t - D_{mi}) - R_{1i} \dot{\eta}_i(t - D_{mi}) - (R_{2i} + G_{ii}^f) \dot{Z}_i(t - D_{mi}) \right. \\ & \left. + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P_{PSV_i}^g(t - D_{ci} - D_{mi}) - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k(t - D_{mi}) + R_{4ik} \dot{Z}_{ik}(t - D_{mi}) + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}(t - D_{mi})) \right] \frac{w_S}{2H_i} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Pour annuler le terme qui contient les interactions nous allons choisir notre commande globale comme suit :

$$P_{PSV_i}^g(t - D_{ci} - D_{mi}) = \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m [R_{3ik} \dot{\eta}_k(t - D_{mi}) + R_{4ik} \dot{Z}_{ik}(t - D_{mi}) + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}(t - D_{mi})] \frac{T_{CH_i}}{K_{HP_i}} \quad (5.18)$$

À l'instant (t), l'équation (5.18) devient :

$$P_{PSV_i}^g(t) = \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m [R_{3ik} \dot{\eta}_k(t + D_{ci}) + R_{4ik} \dot{Z}_{ik}(t + D_{ci}) + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}(t + D_{ci})] \frac{T_{CH_i}}{K_{HP_i}} \quad (5.19)$$

La loi de commande (5.19) ne peut être réalisée car elle dépend des variables à l'instant $(t + D_{ci})$. Pour cela, le prédicteur de Smith permet de prédire ces variables.

La loi de commande restante dépend seulement des variables locales de chaque générateur i , elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta \ddot{y}_{2i} = \left[-\frac{1}{T_{RH_i}} T_{M_i} + \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) P_{CH_i} + \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} P'_{PSV_i} - R_{1i} \dot{\eta}_i(t) - (R_{2i} + G_{ii}^f) \dot{Z}_i(t) \right] \frac{w_S}{2H_i} \quad (5.20)$$

Notons que nous avons utilisé les équations de la turbine thermique pour le calcul du contrôleur. Nous pouvons suivre les mêmes étapes avec une turbine hydraulique.

5.4 Application du prédicteur de Smith

D'après les équations (5.10) et (5.19), nous constatons que les expressions de la commande globale $E_{jdi}^g(t)$ et $P_{PSVi}^g(t)$ dépendent des variables des générateurs i à l'instant $(t + D_{ci})$. Ces variables sont des valeurs futures qu'on ne peut pas mesurer. C'est pourquoi, le prédicteur de Smith est utilisé pour prédire ces variables futures. La prédiction permet de produire une sortie $y_{prédi}(t)$ égale à la sortie du réseau sans délai, ce qui permet d'éliminer le délai dans l'équation caractéristique du système (réseau électrique).

La figure 53 nous montre le principe de l'application de la prédiction sur le réseau électrique. Ce principe consiste à élargir l'application du prédicteur de Smith sur un système multivariable linéaire qui contient deux délais c'est-à-dire délais de mesure et de commande (communication) [14]. Nous allons utiliser le modèle du réseau déduit au chapitre 3 et introduire les délais de mesure et de communication pour former le prédicteur. Les variables prédites sont ensuite utilisées pour la construction de la commande globale. De cette manière, le prédicteur permet d'éliminer l'effet des délais.

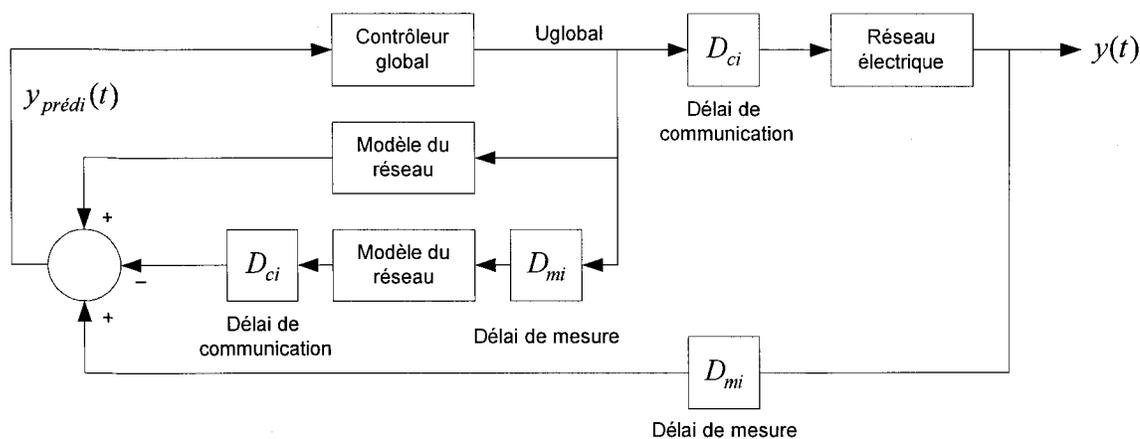


Figure 53 Application de la prédiction pour compenser les délais

Pour faciliter la compréhension de la prédiction illustrée à la figure 53, nous allons calculer la matrice des fonctions de transfert totale du système multivariable. Pour ce faire, nous représentons chaque élément par sa matrice des fonctions de transfert.

- $G_c(s)$: matrice des fonctions de transfert du contrôleur global
- $G_p(s)$: matrice des fonctions de transfert du modèle du réseau électrique
- D_{ci} : délai de commande (délai de communication)
- D_{mi} : délai de mesure

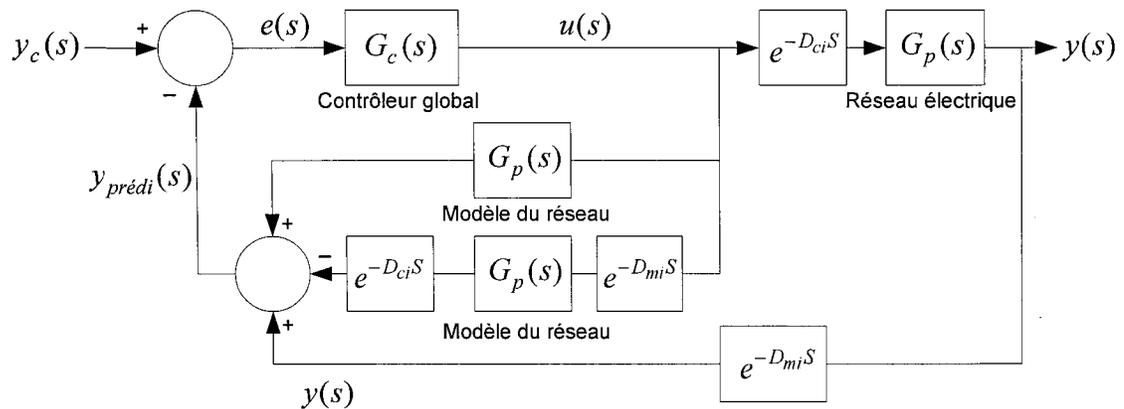


Figure 54 Prédicteur de Smith avec les délais de mesure et de commande

La matrice des fonctions de transfert du nouveau contrôleur est :

$$H(s) = \frac{u(s)}{y_c(s)} = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)(1 - e^{-D_{ci}s}e^{-D_{mi}s})} \quad (5.21)$$

La matrice des fonctions de transfert totale du système est :

$$\frac{y(s)}{y_c(s)} = \frac{H(s)G_p(s)e^{-D_{ci}s}e^{-D_{mi}s}}{1 + H(s)G_p(s)e^{-D_{ci}s}e^{-D_{mi}s}} \quad (5.22)$$

$$\frac{y(s)}{y_c(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-D_{ci}S}e^{-D_{mi}S}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (5.23)$$

Selon (5.23) l'équation caractéristique est :

$$\Delta(s) = 1 + G_c(s)G_p(s) \quad (5.24)$$

Cette équation ne dépend pas des termes de délai $e^{-D_{ci}S}$ et $e^{-D_{mi}S}$, c'est la même équation caractéristique que pour un système sans délai.

Nous constatons que le prédicteur dépend fortement du modèle du réseau électrique et que la prédiction est autant meilleure que le modèle est proche du réseau réel. Notons que dans la simulation nous avons utilisé la représentation d'état $\dot{x} = Ax + Bu$ comme modèle du réseau électrique.

5.5 Tests de simulation

Pour juger de l'efficacité du prédicteur nous allons refaire les tests, que nous avons effectué pour la validation du contrôleur global (court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1, court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1 suivi de l'ouverture de la ligne L1 et court-circuit triphasé de cinq cycles sur la ligne L1) mais nous ajoutons cette fois-ci les délais. Dans les applications réelles, les délais de mesure et de communication varient d'un générateur à l'autre. Cette variation est due essentiellement à la localisation des générateurs qui est différente par rapport au contrôleur global et aussi aux caractéristiques des générateurs. C'est pourquoi, nous allons étudier plusieurs cas en faisant varier les délais de mesure et de communication inter régulateurs (commande).

Notons que les conclusions de tous les tests effectués sont regroupées à la fin de ce chapitre.

Le réseau test est illustré à la figure 55, c'est le même que celui utilisé pour la validation du contrôleur global (chapitre 4).

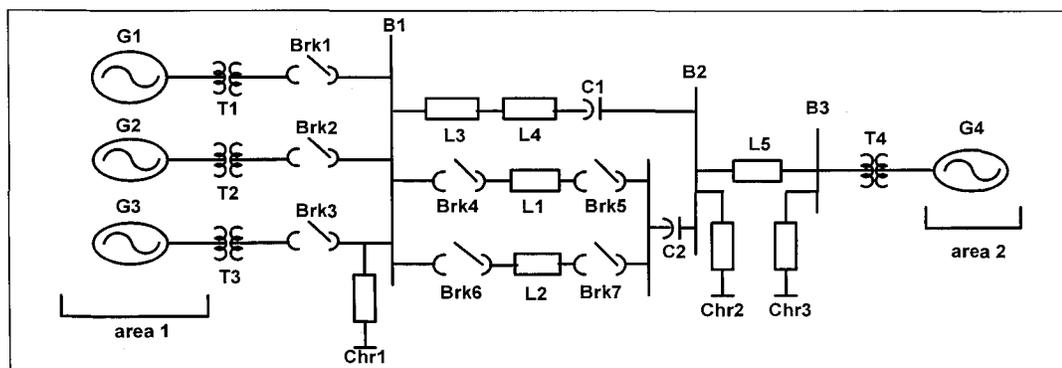


Figure 55 Réseau test

5.5.1 Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1

Le premier test est celui du court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1. Ce test effectué avec différents délais va nous permettre de voir le comportement du contrôleur global en présence du prédicteur.

5.5.1.1 Délai de mesure égal au délai de communication

Ce test consiste à appliquer un délai de mesure qui est égal à celui de communication pour chaque générateur c'est-à-dire $D_{mi} = D_{ci}$. Pour bien voir l'effet du délai et de la compensation, nous allons choisir un délai $D_{mi} = D_{ci} = 100ms$ qui consiste au plus petit délai pour lequel la stabilité du réseau commence à se détériorer et ensuite un délai maximum $D_{mi} = D_{ci} = 200ms$. Notons qu'un délai $D_{mi} = D_{ci} = 200ms$ est dans une seule voie, le délai total dans les deux voies (mesure + commande) est égal à 400ms.

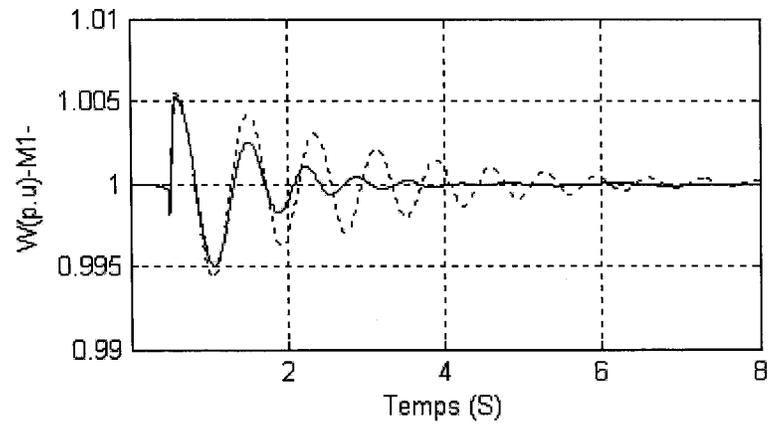


Figure 56 Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 200ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

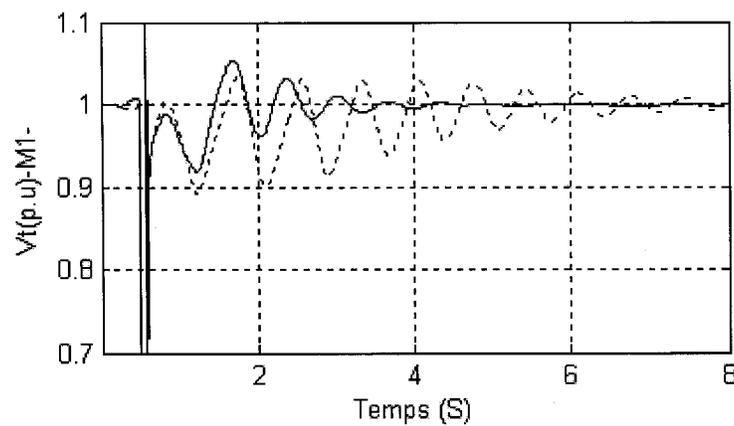


Figure 57 Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 200ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

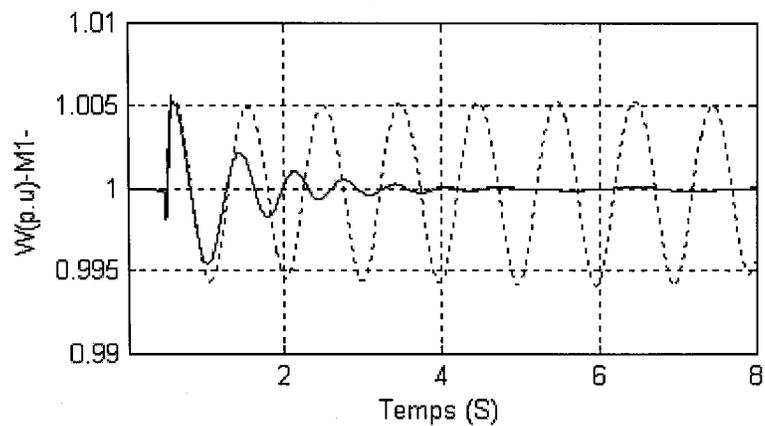


Figure 58 Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

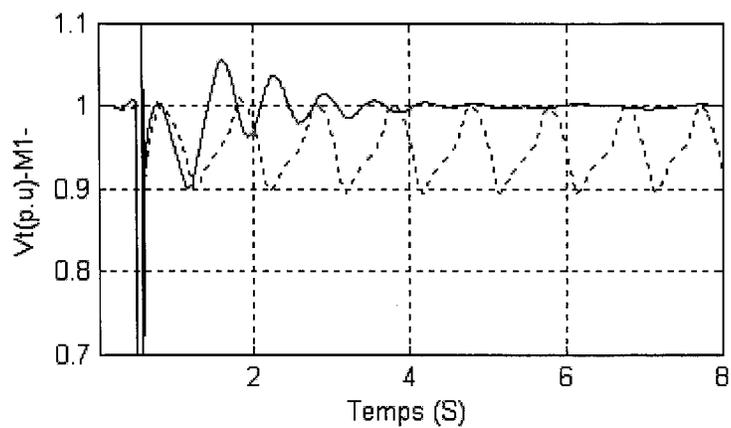


Figure 59 Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.5.1.2 Délai de mesure différent du délai de communication

Nous allons appliquer un délai de mesure D_{mi} différent du délai de communication D_{ci} pour chaque générateur c'est-à-dire $D_{mi} \neq D_{ci}$. Prenons l'exemple d'un délai total de 300ms ($D_{mi} + D_{ci} = 300ms$).

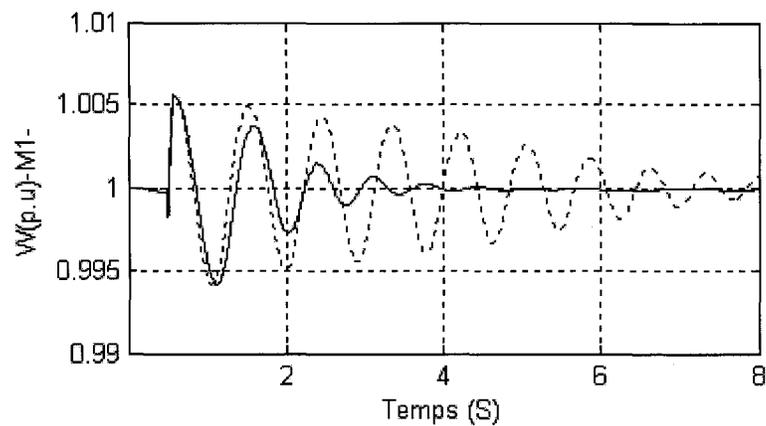


Figure 60 Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 300ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

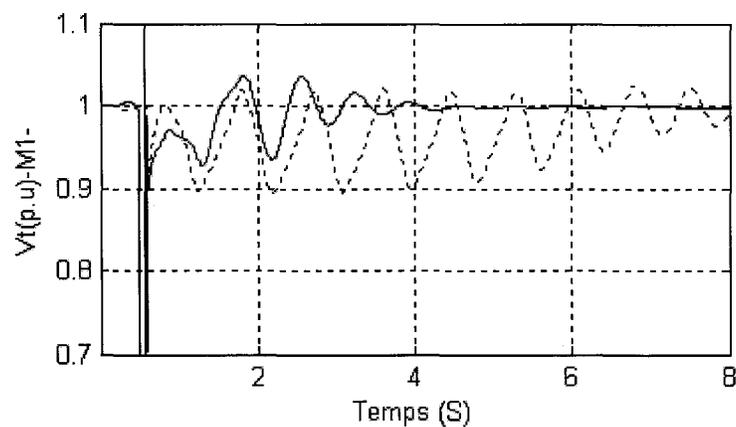


Figure 61 Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 300ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.5.1.3 Délai de mesure et de communication de tous les générateurs différents

Dans ce test le délai de mesure et de communication est différent pour tous les générateurs $D_{m1} \neq D_{m2} \neq D_{m3} \neq D_{m4} \neq D_{c1} \neq D_{c2} \neq D_{c3} \neq D_{c4}$. Prenons l'exemple d'un délai total de 350ms ($D_{mi} + D_{ci} = 350ms$).

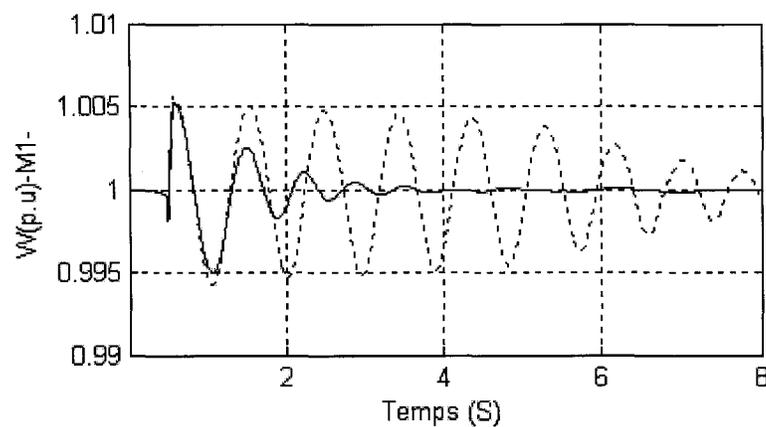


Figure 62 Vitesse de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 350ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

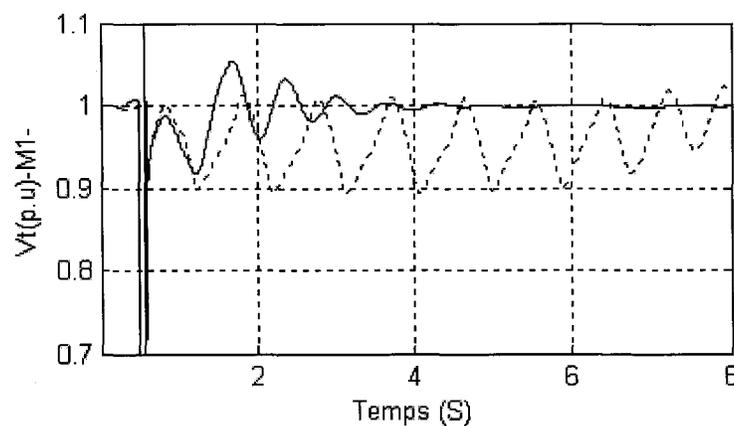


Figure 63 Tension de G1 court-circuit à la barre B1 et délai de 350ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.5.2 Défaut triphasé de quatre cycles à la barre B1 et ouverture de la ligne L1

Le deuxième test est un court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1 suivi de l'ouverture de la ligne L1 après un cycle du début du court-circuit. Les délais de mesure et de communication sont constants pour tous les générateurs $D_{mi} = D_{ci} = 200ms$ et le délai total est $D_{mi} + D_{ci} = 400ms$.

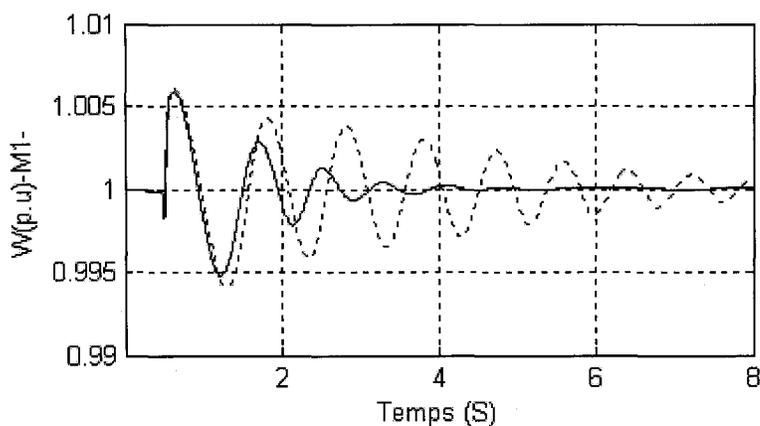


Figure 64 Vitesse de G1 court-circuit avec ligne ouverte et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

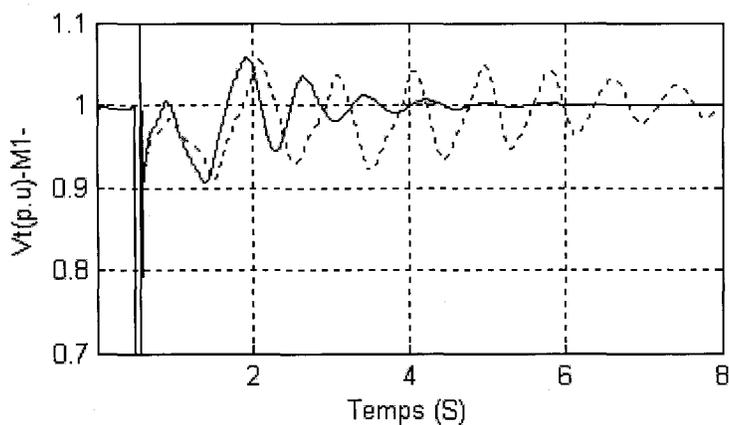


Figure 65 Tension de G1 court-circuit avec ligne ouverte et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.5.3 Défaut triphasé de cinq cycles sur la ligne L1

Le troisième test consiste à effectuer un court-circuit triphasé de cinq cycles sur la ligne L1 avec les délais de mesure et de communication constants pour tous les générateurs

$$D_{mi} = D_{ci} = 200ms \text{ et } D_{mi} + D_{ci} = 400ms.$$

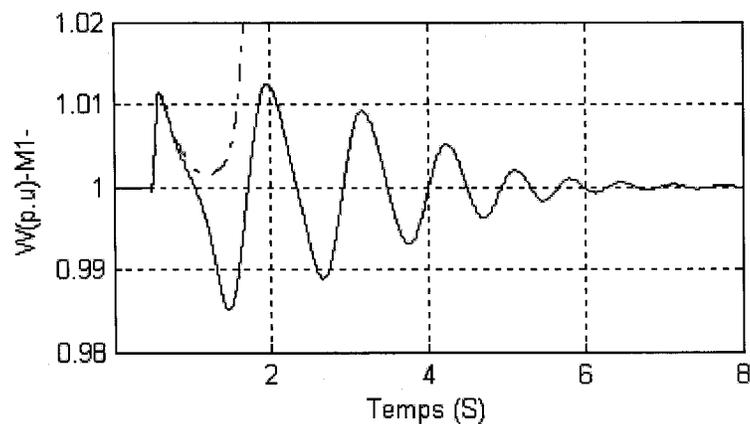


Figure 66 Vitesse de G1 court-circuit de cinq cycles sur L1 et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

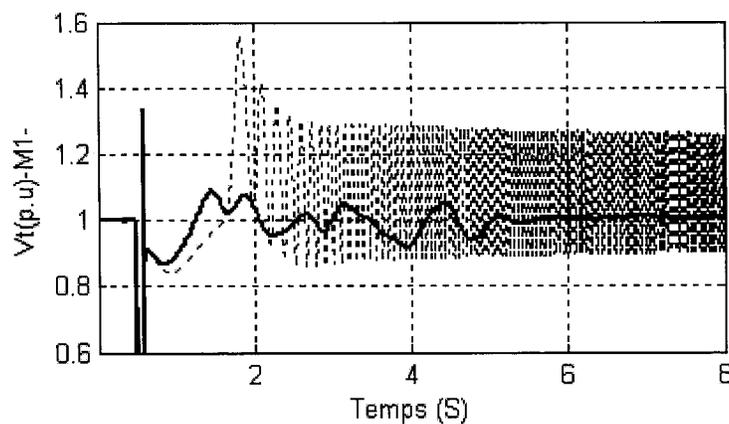


Figure 67 Tension de G1 court-circuit de cinq cycles sur L1 et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.5.4 Les oscillations inter zones

Le dernier résultat illustre les oscillations inter zones pour un court-circuit triphasé de quatre cycles à la barre B1 avec les délais de mesure et de communication constants pour tous les générateurs $D_{mi} = D_{ci} = 200ms$ et $D_{mi} + D_{ci} = 400ms$.

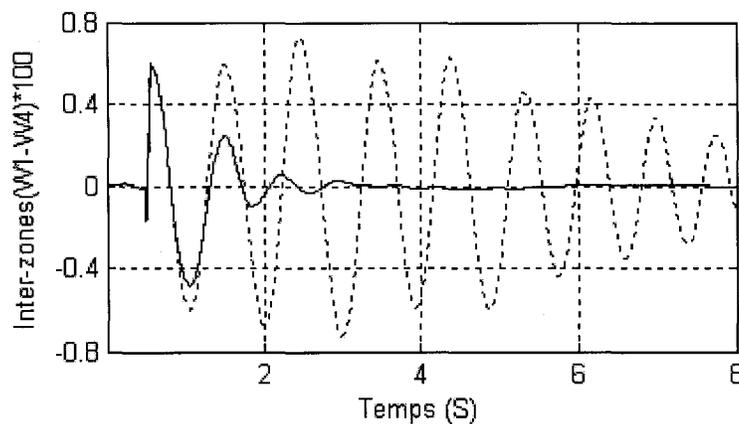


Figure 68 Oscillations inter zones court-circuit de 4 cycles et délai de 400ms
Discontinu : avec délai, Continu : délai compensé

5.6 Conclusion

Dans cette partie nous allons discuter les résultats obtenus pour chacun des tests précédents :

- Les figures 56 à 63 illustrent les résultats du premier test qui consistait à un court-circuit triphasé de quatre cycles appliqué à la barre B1 auxquels sont raccordés les générateurs G_1, G_2 et G_3 . Nous constatons que les sorties du réseau qui sont la tension terminale et la vitesse du rotor avec le délai compensé sont identiques à celles trouvées dans le cas sans délai. Le prédicteur permet de compenser le délai et la performance du cas sans délai a été recouvrée. Cette performance est valable pour

différents délais puisque le prédicteur reste performant face à des délais de mesure et de communication variables.

- Les résultats du test suivant qui consistait à un court-circuit triphasé de quatre cycles appliqué à la barre B1 suivi de l'ouverture de la ligne L1 (disjoncteurs Brk4 et Brk5) sont présentés dans les figures 64 et 65. Nous constatons que l'effet du délai pour une même valeur (400ms) est moins apparent que l'effet du délai pour un court-circuit. Dans ce cas aussi le délai a été éliminé et les sorties compensées sont identiques à celles trouvées dans le cas sans délai.
- Le troisième test représente un court-circuit triphasé de cinq cycles sur la ligne L1. Nous avons déjà trouvé au chapitre 3 que lorsque nous augmentons la durée du court-circuit à cinq cycles le contrôleur local du réseau électrique diverge et sa stabilité ne peut être assurée que par le contrôleur global. Mais dans ce cas c'est-à-dire le court-circuit de cinq cycles, le contrôleur global diverge en présence du délai. Le prédicteur permet de compenser le délai et les sorties du réseau deviennent stables et identiques à celles du cas sans délai (voir figures 66 et 67).
- La figure 68 illustre l'effet du délai sur les oscillations inter zones. En présence du délai, les oscillations inter zones sont plus grandes et le réseau électrique perd sa stabilité. Le prédicteur permet d'éliminer le délai. Les oscillations sont amorties et nous obtenons le même résultat que le cas sans délai.

Dans chacun des tests effectués avec des délais différents et avec des perturbations différentes le contrôleur global basé sur le prédicteur de Smith compense toujours les délais. Les sorties du réseau électrique qui sont la vitesse du rotor et la tension terminale sont identiques au cas sans délai.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La compensation des délais dans une commande hiérarchisée de réseaux électriques est un thème de recherche récent. Dans notre projet, nous proposons une méthode basée sur le principe du prédicteur de Smith pour compenser les délais de mesure et de communication d'une commande globale de réseaux électriques. La contribution de notre travail réside dans une première étape dans l'établissement de la version linéaire de la commande basée sur les mesures à la grandeur du réseau [7] pour améliorer la stabilité du réseau et amortir efficacement les oscillations inter zones. Ensuite nous avons étudié l'existence des délais dans cette commande et son impact sur la performance du contrôleur global. Enfin nous avons compensé les délais à l'aide du prédicteur de Smith.

L'utilisation du modèle multi générateurs qui intègre toutes les interactions du réseau électrique a permis d'élaborer un modèle approprié pour l'application de la commande hiérarchisée. Cette nouvelle approche globale a permis de déterminer les équations du contrôleur global. L'application sur un réseau comportant quatre générateurs a permis de vérifier la performance du contrôleur proposé en présence de diverses perturbations. Les résultats obtenus démontrent que le contrôleur global augmente la performance de l'ensemble (régulateur de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur de puissance) et amortit efficacement les oscillations inter zones.

Les délais de mesure entre les générateurs et le contrôleur global et les délais de communication entre le contrôleur global et les régulateurs locaux détériorent la performance du contrôleur global. Une compensation basée sur le prédicteur de Smith est utilisée pour préserver cette performance en présence de différents délais. Nous présentons la méthodologie pour compenser le délai qui consiste à définir d'une manière générale le principe du prédicteur de Smith puis introduire la version multivariable linéaire du prédicteur avec délai de mesure et de commande [14]. Le contrôleur basé sur

le prédicteur de Smith a permis d'éliminer l'effet des délais et les résultats obtenus sont presque identiques au cas sans délai. La prédiction est basée principalement sur le modèle du réseau électrique. Elle est d'autant meilleure que le modèle est proche du réseau. Le premier inconvénient donc c'est le modèle qui malgré sa validité n'est pas exact. Pour pallier cet inconvénient nous proposons de combiner un observateur avec le prédicteur pour nous permettre d'avoir des prédictions très proches des sorties du réseau et ainsi l'élimination totale du délai.

Pour la robustesse, nous suggérons d'améliorer le travail effectué dans l'annexe 4 qui consiste à réaliser une version adaptative pour l'estimation en ligne des paramètres du contrôleur global. Nous proposons aussi l'intégration des équipements de compensation shunt (compensateurs statiques et dynamiques). Enfin nous espérons que ce thème de recherche sera enrichi par l'utilisation d'autres stratégies pour compenser le délai.

ANNEXE 1

Linéarisation du modèle global

1.1 Le modèle global non linéaire

Le modèle non linéaire est décrit par les équations suivantes:

$$\dot{V}_{di} = \alpha_{1i}V_{di} + \alpha_{2i}V_{qi} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di} \quad (1.1)$$

$$\dot{V}_{qi} = \beta_{1i}V_{di} + \beta_{2i}V_{qi} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi} \quad (1.2)$$

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_i}{dt} = T_{Mi} - G_{ii}^f (V_{di}^2 + V_{qi}^2) - \psi_{wi} \quad (1.3)$$

$$\dot{\delta}_i = w_i - w_s \quad (1.4)$$

Avec

$$\begin{aligned} \psi_{di} = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}^d) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}^d) V_{qk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{dk} \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{qk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) \dot{V}_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) \dot{V}_{qk} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \psi_{qi} = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}^q) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}^q) V_{qk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{dk} \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{qk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) \dot{V}_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) \dot{V}_{qk} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \psi_{wi} = & V_{di} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \\ & + V_{qi} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

1.2 Linéarisation autour du point d'équilibre

Les termes ψ_{di} , ψ_{qi} et ψ_{wi} représentent des non linéarités en termes de sinus et cosinus.

Ci-dessous, les étapes à suivre pour la linéarisation du modèle.

Étape 1 : Changement de variables η_i et Z_i

V_{di} et V_{qi} sont les composantes des axes d/q de la tension terminale du générateur i.

Nous posons $X_{1i} = V_{di}$ et $X_{2i} = V_{qi}$:

$$\Delta X_{1i} = X_{1i} - X_{1ie} \quad (1.8)$$

$$\Delta X_{2i} = X_{2i} - X_{2ie} \quad (1.9)$$

Avec (X_{1ie}, X_{2ie}) un point d'équilibre.

Nous effectuons le changement de variables suivant :

$$\eta_i = \rho_{2i} \Delta X_{1i} - \rho_{1i} \Delta X_{2i} \quad (1.10)$$

$$Z_i = 2X_{1ie} \Delta X_{1i} + 2X_{2ie} \Delta X_{2i} \quad (1.11)$$

Nous allons exprimer ΔX_{1i} et ΔX_{2i} en fonction des nouvelles variables Z_i et η_i :

$$\Delta X_{1i} = \frac{2X_{2ie}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} \eta_i + \frac{\rho_{1i}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} Z_i \quad (1.12)$$

$$\Delta X_{2i} = \frac{-2X_{1ie}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} \eta_i + \frac{\rho_{2i}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} Z_i \quad (1.13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{1i} \\ \Delta X_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2X_{2ie}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} & \frac{\rho_{1i}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} \\ \frac{-2X_{1ie}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} & \frac{\rho_{2i}}{(2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Avec

$$X_{ie} = 2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie} \quad (1.15)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{1i} \\ \Delta X_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2X_{2ie}}{X_{ie}} & \frac{\rho_{1i}}{X_{ie}} \\ \frac{-2X_{1ie}}{X_{ie}} & \frac{\rho_{2i}}{X_{ie}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Par ailleurs on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{1i} \\ \Delta \dot{X}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2X_{2ie}}{X_{ie}} & \frac{\rho_{1i}}{X_{ie}} \\ \frac{-2X_{1ie}}{X_{ie}} & \frac{\rho_{2i}}{X_{ie}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_i \\ \dot{Z}_i \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Étape 2 : Linéarisation de y_{li}

On pose :

$$y_{li} = V_{di}^2 + V_{qi}^2 \quad (1.18)$$

$$y_{1i} = X_{1i}^2 + X_{2i}^2 \quad (1.19)$$

$$y_{1ie} = X_{1ie}^2 + X_{2ie}^2 \quad (1.20)$$

On effectue la linéarisation autour du point de fonctionnement (X_{1ie}, X_{2ie}) :

$$\Delta y_{li} = y_{li} - y_{1ie} \quad (1.21)$$

$$\Delta y_{li} = 2X_{1ie}(X_{1i} - X_{1ie}) + 2X_{2ie}(X_{2i} - X_{2ie}) \quad (1.22)$$

L'erreur sur la sortie devient :

$$\Delta y_{li} = 2X_{1ie}\Delta X_{1i} + 2X_{2ie}\Delta X_{2i} \quad (1.23)$$

Avec le changement de variable on aura :

$$\Delta y_{li} = Z_i \quad (1.24)$$

Étape 3 : Linéarisation des termes ψ_{di} et ψ_{qi}

On tenant compte que $w_{ik} \ll 0$ ($w_{ik} = w_k - w_i$) alors on peut considérer les expressions suivantes :

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^d \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^d) V_{qk} = 0 \quad (1.25)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \sin(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m w_{ik} N_{ik}^q \cos(\delta_{ik} - \phi_{ik}^q) V_{qk} = 0 \quad (1.26)$$

Les termes ψ_{di}^L et ψ_{qi}^L sont les expressions linéaires de ψ_{di} et ψ_{qi} :

$$\begin{aligned} \psi_{di}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) (V_{dk} - V_{dke}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) (V_{qk} - V_{qke}) \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) (\dot{V}_{dk} - \dot{V}_{dke}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) (\dot{V}_{qk} - \dot{V}_{qke}) \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d (V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d)) (\delta_{ik} - \delta_{ik}^e) \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d (V_{dke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) - V_{qke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d)) \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned}
\psi_{qi}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q)(V_{dk} - V_{dke}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q)(V_{qk} - V_{qke}) \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q)(\dot{V}_{dk} - \dot{V}_{dke}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q)(\dot{V}_{qk} - \dot{V}_{qke}) \\
& - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \left(V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \right) (\delta_{ik} - \delta_{ik}^e) \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \left(V_{dke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) - V_{qke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \right)
\end{aligned} \tag{1.28}$$

Avec les changements suivants :

$$X_{1k} = V_{dk}, \Delta X_{1k} = V_{dk} - V_{dke} \tag{1.29}$$

$$X_{2k} = V_{qk}, \Delta X_{2k} = V_{qk} - V_{qke} \tag{1.30}$$

$$\dot{X}_{1k} = \dot{V}_{dk}, \Delta \dot{X}_{1k} = \dot{V}_{dk} - \dot{V}_{dke} \tag{1.31}$$

$$\dot{X}_{2k} = \dot{V}_{qk}, \Delta \dot{X}_{2k} = \dot{V}_{qk} - \dot{V}_{qke} \tag{1.32}$$

$$\delta_{ik} = X_{3k}, \Delta X_{3k} = \delta_{ik} - \delta_{ike} \tag{1.33}$$

Nous obtenons les termes linéaires ψ_{di}^L et ψ_{qi}^L :

$$\begin{aligned}
\psi_{di}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) \Delta X_{1k} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) \Delta X_{2k} \\
& - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \left(V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) \right) \Delta X_{3k} \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) \Delta \dot{X}_{1k} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) \Delta \dot{X}_{2k}
\end{aligned} \tag{1.34}$$

$$\psi_{di}^e = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^d \left(V_{dke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) - V_{qke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) \right) = 0 \quad (1.35)$$

(terme à l'équilibre)

$$\begin{aligned} \psi_{qi}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \Delta X_{1k} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \Delta X_{2k} \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \left(V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \right) \Delta X_{3k} \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q) \Delta \dot{X}_{1k} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m N_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q) \Delta \dot{X}_{2k} \end{aligned} \quad (1.36)$$

$$\psi_{qi}^e = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m R_{ik}^q \left(V_{dke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) - V_{qke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \right) = 0 \quad (1.37)$$

(terme à l'équilibre)

Pour simplifier ces expressions, nous posons :

$$A_{ik}^d = R_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d)$$

$$B_{ik}^d = -R_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d)$$

$$C_{ik}^d = -R_{ik}^d \left(V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) \right)$$

$$H_{ik}^d = N_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d)$$

$$L_{ik}^d = -N_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d)$$

Et

$$A_{ik}^q = R_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q)$$

$$B_{ik}^q = -R_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q)$$

$$C_{ik}^q = -R_{ik}^q \left(V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \right)$$

$$H_{ik}^q = N_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q)$$

$$L_{ik}^q = -N_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q)$$

Après simplification, les termes linéaires sont de la forme suivante :

$$\psi_{di}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (A_{ik}^d \Delta X_{1k} + B_{ik}^d \Delta X_{2k} + C_{ik}^d \Delta X_{3k} + H_{ik}^d \Delta \dot{X}_{1k} + L_{ik}^d \Delta \dot{X}_{2k}) \quad (1.38)$$

$$\psi_{qi}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (A_{ik}^q \Delta X_{1k} + B_{ik}^q \Delta X_{2k} + C_{ik}^q \Delta X_{3k} + H_{ik}^q \Delta \dot{X}_{1k} + L_{ik}^q \Delta \dot{X}_{2k}) \quad (1.39)$$

Nous allons exprimer ψ_{di}^L et ψ_{qi}^L en fonction des variables $\eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} :

$$\begin{aligned} \psi_{di}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m & \left[\frac{2(A_{ik}^d X_{2ke} - B_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}} \eta_k + \frac{(A_{ik}^d \rho_{1k} + B_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}} Z_k + \frac{2(H_{ik}^d X_{2ke} - L_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}} \dot{\eta}_k + \right. \\ & \left. + \frac{(H_{ik}^d \rho_{1k} + L_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}} \dot{Z}_k + C_{ik}^d \Delta X_{3k} \right] \end{aligned} \quad (1.40)$$

$$\begin{aligned} \psi_{qi}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m & \left[\frac{2(A_{ik}^q X_{2ke} - B_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}} \eta_k + \frac{(A_{ik}^q \rho_{1k} + B_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}} Z_k + \frac{2(H_{ik}^q X_{2ke} - L_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}} \dot{\eta}_k \right. \\ & \left. + \frac{(H_{ik}^q \rho_{1k} + L_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}} \dot{Z}_k + C_{ik}^q \Delta X_{3k} \right] \end{aligned} \quad (1.41)$$

Avec

$$D_{ik}^d = \frac{2(A_{ik}^d X_{2ke} - B_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$E_{ik}^d = \frac{(A_{ik}^d \rho_{1k} + B_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$I_{ik}^d = \frac{2(H_{ik}^d X_{2ke} - L_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$J_{ik}^d = \frac{(H_{ik}^d \rho_{1k} + L_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$F_{ik}^d = C_{ik}^d$$

Et

$$D_{ik}^q = \frac{2(A_{ik}^q X_{2ke} - B_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$E_{ik}^q = \frac{(A_{ik}^q \rho_{1k} + B_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$I_{ik}^q = \frac{2(H_{ik}^q X_{2ke} - L_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$J_{ik}^q = \frac{(H_{ik}^q \rho_{1k} + L_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$F_{ik}^q = C_{ik}^q$$

Les termes finaux en fonction des nouvelles variables ont la forme suivante :

$$\psi_{di}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (D_{ik}^d \eta_k + E_{ik}^d Z_k + F_{ik}^d \Delta X_{3k} + I_{ik}^d \dot{\eta}_k + J_{ik}^d \dot{Z}_k) \quad (1.42)$$

$$\psi_{qi}^L = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (D_{ik}^q \eta_k + E_{ik}^q Z_k + F_{ik}^q \Delta X_{3k} + I_{ik}^q \dot{\eta}_k + J_{ik}^q \dot{Z}_k) \quad (1.43)$$

Étape 4 : Calcul de la variable d'état $\dot{\eta}_i$

On sait que :

$$\dot{V}_{di} = \alpha_{1i}V_{di} + \alpha_{2i}V_{qi} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L \quad (1.44)$$

$$\dot{V}_{qi} = \beta_{1i}V_{di} + \beta_{2i}V_{qi} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L \quad (1.45)$$

Et que

$$\dot{X}_{1i} = \alpha_{1i}X_{1i} + \alpha_{2i}X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L \quad (1.46)$$

$$\dot{X}_{2i} = \beta_{1i}X_{1i} + \beta_{2i}X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L \quad (1.47)$$

$$\Delta\dot{X}_{1i} = \alpha_{1i}\Delta X_{1i} + \alpha_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L \quad (1.48)$$

$$\Delta\dot{X}_{2i} = \beta_{1i}\Delta X_{1i} + \beta_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L \quad (1.49)$$

Avec

$$\eta_i = \rho_{2i}\Delta X_{1i} - \rho_{1i}\Delta X_{2i} \quad (1.50)$$

$$\dot{\eta}_i = \rho_{2i}\Delta\dot{X}_{1i} - \rho_{1i}\Delta\dot{X}_{2i} \quad (1.51)$$

Nous remplaçons $\Delta\dot{X}_{1i}$ et $\Delta\dot{X}_{2i}$ par leurs expressions dans (1.51) :

$$\dot{\eta}_i = \rho_{2i}(\alpha_{1i}\Delta X_{1i} + \alpha_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L) - \rho_{1i}(\beta_{1i}\Delta X_{1i} + \beta_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L) \quad (1.52)$$

$$\dot{\eta}_i = (\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i})\Delta X_{1i} + (\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})\Delta X_{2i} + \rho_{2i}\psi_{di}^L - \rho_{1i}\psi_{qi}^L \quad (1.53)$$

Puis nous exprimons $\dot{\eta}_i$ en fonction des variables $\eta_i, Z_i, \eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} on aura :

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i = & \frac{2[X_{2ie}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) - X_{1ie}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})]}{X_{ie}} \eta_i + \frac{[\rho_{1i}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) + \rho_{2i}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})]}{X_{ie}} Z_i \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m [(\rho_{2i}D_{ik}^d - \rho_{1i}D_{ik}^q)\eta_k + (\rho_{2i}E_{ik}^d - \rho_{1i}E_{ik}^q)Z_k + (\rho_{2i}I_{ik}^d - \rho_{1i}I_{ik}^q)\dot{\eta}_k + (\rho_{2i}J_{ik}^d - \rho_{1i}J_{ik}^q)\dot{Z}_k + (\rho_{2i}F_{ik}^d - \rho_{1i}F_{ik}^q)\Delta X_{3k}] \end{aligned} \quad (1.54)$$

$$\dot{\eta}_i = K_{1i}\eta_i + K_{2i}Z_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (K_{3ik}\eta_k + K_{4ik}Z_k + K_{5ik}\Delta X_{3k} + K_{6ik}\dot{\eta}_k + K_{7ik}\dot{Z}_k) \quad (1.55)$$

Termes locaux

$$K_{1i} = \frac{2[X_{2ie}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) - X_{1ie}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})]}{X_{ie}}$$

$$K_{2i} = \frac{[\rho_{1i}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) + \rho_{2i}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i})]}{X_{ie}}$$

Termes globaux

$$K_{3ik} = (\rho_{2i}D_{ik}^d - \rho_{1i}D_{ik}^q)$$

$$K_{4ik} = (\rho_{2i}E_{ik}^d - \rho_{1i}E_{ik}^q)$$

$$K_{5ik} = (\rho_{2i}F_{ik}^d - \rho_{1i}F_{ik}^q)$$

$$K_{6ik} = (\rho_{2i}I_{ik}^d - \rho_{1i}I_{ik}^q)$$

$$K_{7ik} = (\rho_{2i}J_{ik}^d - \rho_{1i}J_{ik}^q)$$

Les termes K_{1i}, K_{2i} représentent les paramètres locaux du générateur i , et les termes $K_{3ik}, K_{4ik}, K_{5ik}, K_{6ik}$ et K_{7ik} les interactions avec les autres générateurs k .

Étape 5 : Calcul de la deuxième variable d'état \dot{Z}_i

$$Z_i = 2X_{1ie}\Delta X_{1i} + 2X_{2ie}\Delta X_{2i} \quad (1.56)$$

$$\dot{Z}_i = 2X_{1ie}\Delta \dot{X}_{1i} + 2X_{2ie}\Delta \dot{X}_{2i} \quad (1.57)$$

$$\dot{Z}_i = 2X_{1ie}(\alpha_{1i}\Delta X_{1i} + \alpha_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{1i}E_{fdi} + \psi_{di}^L) + 2X_{2ie}(\beta_{1i}\Delta X_{1i} + \beta_{2i}\Delta X_{2i} + \rho_{2i}E_{fdi} + \psi_{qi}^L) \quad (1.58)$$

$$\dot{Z}_i = (2X_{1ie}\alpha_{1i} + 2X_{2ie}\beta_{1i})\Delta X_{1i} + 2(X_{1ie}\alpha_{2i} + X_{2ie}\beta_{2i})\Delta X_{2i} + 2(X_{1ie}\rho_{1i} + X_{2ie}\rho_{2i})E_{fdi} + 2(X_{1ie}\psi_{di}^L + X_{2ie}\psi_{qi}^L) \quad (1.59)$$

Nous exprimons \dot{Z}_i en fonction des nouvelles variables $\eta_i, Z_i, \eta_k, Z_k, \dot{\eta}_k, \dot{Z}_k$ et ΔX_{3k} :

$$\begin{aligned} \dot{Z}_i = & \frac{(4(X_{1ie}X_{2ie}\alpha_{1i} - X_{1ie}^2\alpha_{2i} + X_{2ie}^2\beta_{1i} - X_{1ie}X_{2ie}\beta_{2i}))}{X_{ie}} \eta_i \\ & + \frac{(2(X_{1ie}\alpha_{1i}\rho_{1i} + X_{1ie}\alpha_{2i}\rho_{2i} + X_{2ie}\beta_{1i}\rho_{1i} + X_{2ie}\beta_{2i}\rho_{2i}))}{X_{ie}} Z_i + (2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})E_{fdi} \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m [2(X_{1ie}D_{ik}^d + X_{2ie}D_{ik}^q)\eta_k + 2(X_{1ie}E_{ik}^d + X_{2ie}E_{ik}^q)Z_k + 2(X_{1ie}I_{ik}^d + X_{2ie}I_{ik}^q)\dot{\eta}_k \\ & + 2(X_{1ie}J_{ik}^d + X_{2ie}J_{ik}^q)\dot{Z}_k + 2(X_{1ie}F_{ik}^d + X_{2ie}F_{ik}^q)\Delta X_{3k}] \end{aligned} \quad (1.60)$$

Termes locaux

$$T_{1i} = \frac{(4(X_{1ie}X_{2ie}\alpha_{1i} - X_{1ie}^2\alpha_{2i} + X_{2ie}^2\beta_{1i} - X_{1ie}X_{2ie}\beta_{2i}))}{X_{ie}}$$

$$T_{2i} = \frac{(2(X_{1ie}\alpha_{1i}\rho_{1i} + X_{1ie}\alpha_{2i}\rho_{2i} + X_{2ie}\beta_{1i}\rho_{1i} + X_{2ie}\beta_{2i}\rho_{2i}))}{X_{ie}}$$

$$T_{3i} = (2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie})$$

Termes globaux

$$T_{4ik} = 2(X_{1ie}D_{ik}^d + X_{2ie}D_{ik}^q)$$

$$T_{5ik} = 2(X_{1ie}E_{ik}^d + X_{2ie}E_{ik}^q)$$

$$T_{6ik} = 2(X_{1ie}F_{ik}^d + X_{2ie}F_{ik}^q)$$

$$T_{7ik} = 2(X_{1ie}I_{ik}^d + X_{2ie}I_{ik}^q)$$

$$T_{8ik} = 2(X_{1ie}J_{ik}^d + X_{2ie}J_{ik}^q)$$

$$\dot{Z}_i = T_{1i}\eta_i + T_{2i}Z_i + T_{3i}E_{fdi} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (T_{4ik}\eta_k + T_{5ik}Z_k + T_{6ik}\Delta X_{3k} + T_{7ik}\dot{\eta}_k + T_{8ik}\dot{Z}_k) \quad (1.61)$$

Les termes T_{1i}, T_{2i} et T_{3i} représentent les paramètres du générateur i , et les termes $T_{4ik}, T_{5ik}, T_{6ik}, T_{7ik}$ et T_{8ik} les interactions avec les autres générateurs k .

Étape 6 : Linéarisation de ψ_{wi}

$$\begin{aligned} \psi_{wi} = & V_{di} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \\ & + V_{qi} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \sin(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{dk} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} \cos(\delta_{ik} + \varphi_{ik}) V_{qk} \right) \end{aligned} \quad (1.62)$$

Nous allons faire une linéarisation par rapport aux variables $V_{di}, V_{qi}, V_{dk}, V_{qk}$ et δ_{ik} :

$$\begin{aligned} \psi_{wi}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}] (V_{di} - V_{die}) \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}] (V_{qi} - V_{qie}) \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{die} + \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qie}] (V_{dk} - V_{dke}) \\ & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qie} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{die}] (V_{qk} - V_{qke}) \\ & - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) (V_{qie} V_{qke} + V_{die} V_{dke}) + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) (V_{die} V_{qke} - V_{qie} V_{dke})] (\delta_{ik} - \delta_{ik}^e) \\ & + V_{die} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} (\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}) + V_{qie} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} (\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}) \end{aligned} \quad (1.63)$$

$$\begin{aligned}
\psi_{wi}^L = & \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{dke} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qke}] \Delta X_{1i} \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{dke} + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qke}] \Delta X_{2i} \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{die} + \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qie}] \Delta X_{1k} \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qie} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{die}] \Delta X_{2k} \\
& - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})(V_{qie}V_{qke} + V_{die}V_{dke}) + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})(V_{die}V_{qke} - V_{qie}V_{dke})] \Delta X_{3k}
\end{aligned} \tag{1.64}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{wi}^e = & V_{die} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{dke} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qke}] + \\
& V_{qie} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{dke} + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik})V_{qke}] = 0
\end{aligned} \tag{1.65}$$

(terme à l'équilibre)

Contrairement aux deux termes précédents, le terme ψ_{wi}^L est divisé en deux parties. Une partie locale qui dépend du générateur i et une partie globale qui dépend des autres générateurs k .

$$\psi_{wi}^L = \mu_{1i} \Delta X_{1i} + \mu_{2i} \Delta X_{2i} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (\mu_{3ik} \Delta X_{1k} + \mu_{4ik} \Delta X_{2k} + \mu_{5ik} \Delta X_{3k}) \tag{1.66}$$

Nous remplaçons $\Delta X_{1i}, \Delta X_{2i}, \Delta X_{1k}$ et ΔX_{2k} par leurs valeurs en fonction de η_i, Z_i, Z_k, η_k et ΔX_{3k} on aura :

Termes locaux

$$R_{1i} = \frac{2(\mu_{1i} X_{2ie} - \mu_{2i} X_{1ie})}{X_{ie}}$$

$$R_{2i} = \frac{(\mu_{1i} \rho_{1i} + \mu_{2i} \rho_{2i})}{X_{ie}}$$

Termes globaux

$$R_{3ik} = \frac{2(\mu_{3ik} X_{2ke} - \mu_{4ik} X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$R_{4ik} = \frac{(\mu_{3ik} \rho_{1k} + \mu_{4ik} \rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$R_{5ik} = \mu_{5ik}$$

Après simplification on obtient :

$$\psi_{wi}^L = R_{1i} \eta_i + R_{2i} Z_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik} \eta_k + R_{4ik} Z_k + R_{5ik} \Delta X_{3k}) \quad (1.67)$$

Étape 7 : Calcul de $\frac{dw_i}{dt}$

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_i}{dt} = T_{Mi} - G_{ii}^f (V_{di}^2 + V_{qi}^2) - \psi_{wi} \quad (1.68)$$

Nous remplaçons Δy_{1i} par sa valeur linéaire :

$$Z_i = \Delta y_{1i} \quad (1.69)$$

Et aussi ψ_{wi} par :

$$\psi_{wi}^L = R_{1i}\eta_i + R_{2i}Z_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k}) \quad (1.70)$$

On aura :

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_s}{dt} = T_{Mi} - G_{ii}^f Z_i - R_{1i}\eta_i - R_{2i}Z_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k}) \quad (1.71)$$

$$\frac{2H_i}{w_s} \frac{dw_s}{dt} = T_{Mi} - R_{1i}\eta_i - (R_{2i} + G_{ii}^f)Z_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k}) \quad (1.72)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{w_s}{2H_i} (T_{Mi} - R_{1i}\eta_i - (R_{2i} + G_{ii}^f)Z_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (R_{3ik}\eta_k + R_{4ik}Z_k + R_{5ik}\Delta X_{3k})) \quad (1.73)$$

Les termes R_{1i}, R_{2i} représentent les paramètres du générateur i , et les termes R_{3ik}, R_{4ik} et R_{5ik} les interactions avec les autres générateurs k .

Étape 8 : Forme matricielle

Enfin le système linéaire aura la forme matricielle suivante :

$$\Delta \dot{X}_i = A_i \Delta X_i + B_i \Delta U_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m A_k \Delta X_k \quad (1.74)$$

$$\Delta Y_i = C_i \Delta X_i \quad (1.75)$$

$$\Delta y_{1i} = Z_i \quad (1.76)$$

$$\Delta y_{2i} = w_i - w_s \quad (1.77)$$

Dans l'expression du modèle linéaire décrit par l'équation (1.74), les termes locaux et les termes globaux sont bien distincts. Les termes en i représentent les variables locales de chaque générateur i et les autres termes en k les interactions (les perturbations) dues aux autres générateurs k du réseau électrique. Les matrices A_i, B_i, A_{ik} et C_i sont composées des coefficients constants.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\eta}_i \\ \dot{Z}_i \\ \dot{\delta}_i \\ \dot{w}_i \\ \dot{T}_{Mi} \\ \dot{p}_{CHi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{1i} & K_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{1i} & T_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-w_s R_{1i}}{2H_i} & \frac{-(R_{2i} + G_{ii}^f)w_s}{2H_i} & 0 & 0 & \frac{w_s}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{RH_i}} & \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \\ \Delta\delta_i \\ w_i - w_s \\ T_{Mi} \\ p_{CHi} \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_{3i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \\ 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{fdi} \\ P_{SVi} \end{bmatrix} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \begin{bmatrix} K_{3ik} & K_{4ik} & K_{5ik} & K_{6ik} & K_{7ik} \\ T_{4ik} & T_{5ik} & T_{6ik} & T_{7ik} & T_{8ik} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{3ik}w_s}{2H_i} & \frac{-R_{4ik}w_s}{2H_i} & \frac{-R_{5ik}w_s}{2H_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_k \\ Z_k \\ \Delta X_{3k} \\ \dot{\eta}_k \\ \dot{Z}_k \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1.78}$$

$$\begin{bmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_i \\ Z_i \\ \Delta\delta_i \\ w_i - w_s \\ \Delta T_{Mi} \\ \Delta p_{CHi} \end{bmatrix} \tag{1.79}$$

Avec

$$A_i = \begin{bmatrix} K_{1i} & K_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{1i} & T_{2i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-w_s R_{1i}}{2H_i} & \frac{-(R_{2i} + G_{ii}^f)w_s}{2H_i} & 0 & 0 & \frac{w_s}{2H_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{RH_i}} & \left(\frac{1}{T_{RH_i}} - \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix}$$

$$A_{ik} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \begin{bmatrix} K_{3ik} & K_{4ik} & K_{5ik} & K_{6ik} & K_{7ik} \\ T_{4ik} & T_{5ik} & T_{6ik} & T_{7ik} & T_{8ik} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{3ik} w_s}{2H_i} & \frac{-R_{4ik} w_s}{2H_i} & \frac{-R_{5ik} w_s}{2H_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_{3i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{HP_i}}{T_{CH_i}} \\ 0 & \frac{-1}{T_{CH_i}} \end{bmatrix}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ANNEXE 2

Les paramètres du modèle du réseau électrique

2.1 Paramètres du modèle non linéaire du réseau électrique

$$\alpha_{1i} = \frac{-\left(\frac{x_{di}(G_{ii}^f)^2}{x'_{di}T'_{doi}} + \frac{x_{qi}(B_{ii}^f)^2}{x'_{qi}T'_{qoi}} + \frac{B_{ii}^f}{x'_{qi}T'_{qoi}}\left(\frac{x_{qi}}{x'_{di}} - 1\right)\right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\alpha_{2i} = \frac{G_{ii}^f B_{ii}^f \left(\frac{x_{di}}{x'_{di}T'_{doi}} - \frac{x_{qi}}{x'_{qi}T'_{qoi}}\right) + \frac{G_{ii}^f}{x'_{di}T'_{doi}}\left(\frac{x_{di}-x'_{di}}{x'_{di}}\right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\alpha_{3ik} = \frac{-\left(\frac{x_{di}G_{ik}^f G_{ii}^f}{x'_{di}T'_{doi}} + \frac{x_{qi}B_{ik}^f B_{ii}^f}{x'_{qi}T'_{qoi}}\right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\alpha_{4ik} = \frac{\left(\frac{x_{di}G_{ii}^f B_{ik}^f}{x'_{di}T'_{doi}} - \frac{x_{qi}G_{ik}^f B_{ii}^f}{x'_{qi}T'_{qoi}}\right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\alpha_{5ik} = \frac{-(G_{ii}^f G_{ik}^f + B_{ii}^f B_{ik}^f)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\alpha_{6ik} = \frac{(G_{ii}^f B_{ik}^f - B_{ii}^f G_{ik}^f)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f\left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}}\right)}$$

$$\rho_{1i} = \frac{\frac{G_{ii}^f}{x'_{doi} T'_{doi}}}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\rho_{2i} = \frac{\frac{-(B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}})}{x'_{doi} T'_{doi}}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{1i} = \frac{\left(\frac{x_{di} G_{ii}^f}{x'_{di} T'_{doi}} \left(B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right) - \frac{G_{ii}^f}{x'_{qi} T'_{qoi}} + \left(\frac{x_{qi}}{x'_{di}} - x_{qi} B_{ii}^f - 1 \right) \right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{2i} = \frac{\left(\frac{\left(B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right) (x_{di} B_{ii}^f + \frac{x_{di} - x'_{di}}{x'_{di}})}{x'_{di} T'_{doi}} + \frac{(G_{ii}^f)^2 x_{qi}}{x'_{qi} T'_{qoi}} \right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{3ik} = \frac{\frac{x_{di} G_{ik}^f}{x'_{di} T'_{doi}} \left(B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right) - \left(\frac{x_{qi} G_{ii}^f B_{ik}^f}{x'_{qi} T'_{qoi}} \right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{4ik} = \frac{\left(\frac{(B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}})x_{di}B_{ik}^f}{x'_{di}T'_{doi}} \right) - \frac{x_{qi}G_{ii}^f G_{ik}^f}{x'_{qi}T'_{qoi}}}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{5ik} = \frac{\left(G_{ii}^f B_{ik}^f - (B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}})G_{ii}^f \right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$\beta_{6ik} = \frac{\left(G_{ii}^f G_{ik}^f + (B_{ii}^f + \frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}})B_{ik}^f \right)}{(G_{ii}^f)^2 + (B_{ii}^f)^2 + B_{ii}^f \left(\frac{1}{x'_{di}} - \frac{1}{x'_{qi}} \right)}$$

$$R_{ik}^d = \sqrt{\alpha_{3ik}^2 + \alpha_{4ik}^2} \quad R_{ik}^q = \sqrt{\beta_{3ik}^2 + \beta_{4ik}^2}$$

$$N_{ik}^d = \sqrt{\alpha_{5ik}^2 + \alpha_{6ik}^2} \quad N_{ik}^q = \sqrt{\beta_{5ik}^2 + \beta_{6ik}^2}$$

$$\theta_{ik}^d = a \tan(\alpha_{4ik} / \alpha_{3ik}) \quad \theta_{ik}^q = a \tan(\beta_{4ik} / \beta_{3ik})$$

$$\phi_{ik}^q = a \tan(\beta_{6ik} / \beta_{5ik}) \quad \phi_{ik}^d = a \tan(\alpha_{6ik} / \alpha_{5ik})$$

$$\varphi_{ik} = a \tan(B_{ik}^f / G_{ik}^f) \quad M_{ik} = \sqrt{(G_{ik}^f)^2 + (\beta_{ik}^f)^2}$$

2.2 Paramètres du modèle linéaire du réseau électrique

$$\begin{aligned}
A_{ik}^d &= R_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) & A_{ik}^q &= R_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \\
B_{ik}^d &= -R_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) & B_{ik}^q &= -R_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) \\
H_{ik}^d &= N_{ik}^d \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) & H_{ik}^q &= N_{ik}^q \cos(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q) \\
L_{ik}^d &= -N_{ik}^d \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^d) & L_{ik}^q &= -N_{ik}^q \sin(\delta_{ik}^e - \phi_{ik}^q) \\
D_{ik}^d &= \frac{2(A_{ik}^d X_{2ke} - B_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}} & D_{ik}^q &= \frac{2(A_{ik}^q X_{2ke} - B_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}} \\
E_{ik}^d &= \frac{(A_{ik}^d \rho_{1k} + B_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}} & E_{ik}^q &= \frac{(A_{ik}^q \rho_{1k} + B_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}} \\
I_{ik}^d &= \frac{2(H_{ik}^d X_{2ke} - L_{ik}^d X_{1ke})}{X_{ke}} & I_{ik}^q &= \frac{2(H_{ik}^q X_{2ke} - L_{ik}^q X_{1ke})}{X_{ke}} \\
J_{ik}^d &= \frac{(H_{ik}^d \rho_{1k} + L_{ik}^d \rho_{2k})}{X_{ke}} & J_{ik}^q &= \frac{(H_{ik}^q \rho_{1k} + L_{ik}^q \rho_{2k})}{X_{ke}} \\
F_{ik}^d &= C_{ik}^d & F_{ik}^q &= C_{ik}^q \\
C_{ik}^d &= -R_{ik}^d (V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^d)) \\
C_{ik}^q &= -R_{ik}^q (V_{dke} \sin(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q) + V_{qke} \cos(\delta_{ik}^e - \theta_{ik}^q)) \\
K_{1i} &= \frac{2(X_{2ie}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) - X_{1ie}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i}))}{X_{ie}} \\
K_{2i} &= \frac{(\rho_{1i}(\rho_{2i}\alpha_{1i} - \rho_{1i}\beta_{1i}) + \rho_{2i}(\rho_{2i}\alpha_{2i} - \rho_{1i}\beta_{2i}))}{X_{ie}} \\
K_{3ik} &= (\rho_{2i} D_{ik}^d - \rho_{1i} D_{ik}^q) \\
K_{4ik} &= (\rho_{2i} E_{ik}^d - \rho_{1i} E_{ik}^q) \\
K_{5ik} &= (\rho_{2i} F_{ik}^d - \rho_{1i} F_{ik}^q) \\
K_{6ik} &= (\rho_{2i} I_{ik}^d - \rho_{1i} I_{ik}^q)
\end{aligned}$$

$$K_{7ik} = (\rho_{2i} J_{ik}^d - \rho_{1i} J_{ik}^q)$$

$$T_{1i} = \frac{(4(X_{1ie} X_{2ie} \alpha_{1i} - X_{1ie}^2 \alpha_{2i} + X_{2ie}^2 \beta_{1i} - X_{1ie} X_{2ie} \beta_{2i}))}{X_{ie}}$$

$$T_{2i} = \frac{(2(X_{1ie} \alpha_{1i} \rho_{1i} + X_{1ie} \alpha_{2i} \rho_{2i} + X_{2ie} \beta_{1i} \rho_{1i} + X_{2ie} \beta_{2i} \rho_{2i}))}{X_{ie}}$$

$$T_{3i} = (2\rho_{1i} X_{1ie} + 2\rho_{2i} X_{2ie})$$

$$T_{4ik} = 2(X_{1ie} D_{ik}^d + X_{2ie} D_{ik}^q)$$

$$T_{5ik} = 2(X_{1ie} E_{ik}^d + X_{2ie} E_{ik}^q)$$

$$T_{6ik} = 2(X_{1ie} F_{ik}^d + X_{2ie} F_{ik}^q)$$

$$T_{7ik} = 2(X_{1ie} I_{ik}^d + X_{2ie} I_{ik}^q)$$

$$T_{8ik} = 2(X_{1ie} J_{ik}^d + X_{2ie} J_{ik}^q)$$

$$\mu_{1i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}]$$

$$\mu_{2i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{dke} + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qke}]$$

$$\mu_{3ik} = M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{die} + \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qie}]$$

$$\mu_{4ik} = M_{ik} [\cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{qie} - \sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) V_{die}]$$

$$\mu_{5ik} = -M_{ik} [\sin(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) (V_{qie} V_{qke} + V_{die} V_{dke}) + \cos(\delta_{ik}^e + \varphi_{ik}) (V_{die} V_{qke} - V_{qie} V_{dke})]$$

$$R_{1i} = \frac{2(\mu_{1i} X_{2ie} - \mu_{2i} X_{1ie})}{X_{ie}}$$

$$R_{2i} = \frac{(\mu_{1i} \rho_{1i} + \mu_{2i} \rho_{2i})}{X_{ie}}$$

$$R_{3ik} = \frac{2(\mu_{3ik} X_{2ke} - \mu_{4ik} X_{1ke})}{X_{ke}}$$

$$R_{4ik} = \frac{(\mu_{3ik}\rho_{1k} + \mu_{4ik}\rho_{2k})}{X_{ke}}$$

$$R_{5ik} = \mu_{5ik}$$

$$X_{ie} = 2\rho_{1i}X_{1ie} + 2\rho_{2i}X_{2ie}$$

ANNEXE 3

Paramètres du réseau test et données de simulation

3.1 Paramètres du réseau test

a. Paramètres des générateurs

Paramètre	G1	G2	G3	G4
S	4116MVA	1000MVA	537MVA	35000MVA
V	13.8KV	13.8KV	13.8KV	13.8KV
f	60Hz	60Hz	60Hz	60Hz
T'_{do}	8,62	8,41	8,41	8,41
T''_{do}	0,07	0,07	0,07	0,07
T''_{qo}	0,18	0,2	0,2	0,2
X_d	0,986	0,991	0,991	0,986
X'_d	0,31	0,31	0,31	0,31
X''_d	0,22	0,22	0,22	0,22
X_q	0,635	0,63	0,63	0,635
X'_q	0,34	0,34	0,34	0,34
R_s	0,0028544	0,0028544	0,0028544	0,0028544
H	4,012	4	4	4,2
X_L	0.14	0.14	0.14	0.14

b. Paramètres des lignes

Lignes	Longueur	résistance	inductance	Capacitance
L1	230.1Km	0,015Ohm/Km	0,0008818H/Km	1.3099e-8 F/Km
L2	230.1Km	0,015Ohm/Km	0,0008818H/Km	1.3099e-8 F/Km

L3	115Km	0,015Ohm/Km	0,0008818H/Km	1.3099e-8 F/Km
L4	115Km	0,015Ohm/Km	0,0008818H/Km	1.3099e-8 F/Km

c. Paramètres des charges

Chr1=(1Mw,330Mvar)	Chr2=(30Mw,660Mvar)	Chr3=(35e+03Mw,11.5e+003Mvar)
--------------------	---------------------	-------------------------------

C1=30,6 Ohm	C2=15,3 Ohm
-------------	-------------

d. Paramètres des transformateurs

Transformateur	Puissance de base	Tension de base
T1	4116MVA	13,8Kv/735Kv
T2	1000MVA	13,8Kv/735Kv
T3	537MVA	13,8Kv/735Kv
T4	35000MVA	13,8Kv/735Kv

3.2 Paramètres des régulateurs conventionnels

Dans cette partie de l'annexe 3, nous allons présenter les valeurs des paramètres des régulateurs conventionnels du réseau électrique.

a. Régulateur automatique de tension (AVR)

Gain du régulateur	$K_a = 200$	$K_e = 1$	$K_f = 0.001$	$T_b = 0$
Constante de temps	$T_a = 0.001$	$T_e = 0$	$T_f = 0.1$	$T_c = 0$

b. Stabilisateur multi-bandes IEEE PSS4B

Basse fréquence	$F_L = 0.04\text{Hz}, K_L = 6.25$
Moyenne fréquence	$F_I = 0.8\text{Hz}, K_I = 42$
Haute fréquence	$F_H = 11.0\text{Hz}, K_H = 150$

c. Régulateur de vitesse (Speed governor)

Gain du régulateur	$K_p = 3.2$	$K_I = 0.45$	$K_D = 0.675$	$R_p = 0.05$
--------------------	-------------	--------------	---------------	--------------

d. Servomoteur de vannage

Gain du servomoteur	$K_a = 5e-2$
Constante de temps	$T_a = 0.007$

ANNEXE 4

Estimation des paramètres du contrôleur

Le contrôleur global linéaire étudié précédemment a démontré son efficacité face aux courts-circuits et aux petites variations de puissance. La présence de grandes perturbations comme une variation importante de la charge peut changer les paramètres du réseau électrique et ainsi son point de fonctionnement. Afin d'améliorer la robustesse du contrôleur global, nous allons proposer une version adaptative. Un processus d'adaptation permet d'ajuster les paramètres du contrôleur après une variation de la charge du réseau électrique.

Avant de présenter le processus d'adaptation. Il est important de parler de la modélisation des charges dynamiques. Pour cela, nous introduisons le modèle de Karisson-Hill [24] pour la modélisation des charges dynamiques (non linéaires).

$$T_p \frac{dP_{ri}}{dt} + P_{ri} = P_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\alpha_s} - P_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\alpha_t} \quad (4.1)$$

$$T_Q \frac{dQ_{ri}}{dt} + Q_{ri} = Q_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\beta_s} - Q_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\beta_t} \quad (4.2)$$

$$P_{Li} = P_{ri} + P_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\alpha_t} = \left[P_{ri} \frac{1}{V_i^2} + P_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\alpha_t-2} \right] V_i^2 = K_{P_i}(t) V_i^2 \quad (4.3)$$

$$Q_{Li} = Q_{ri} + Q_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\beta_t} = \left[Q_{ri} \frac{1}{V_i^2} + Q_{oi} \left(\frac{V_i}{V_{oi}}\right)^{\beta_t-2} \right] V_i^2 = K_{Q_i}(t) V_i^2 \quad (4.4)$$

Notons que dans le cas des charges statiques $P_{ri} = Q_{ri} = 0$ et $T_p = T_Q = 0$.

$Z_{Li}(t)$ représente l'impédance instantanée des charges dynamiques :

$$Z_{Li}(t) = K_{P_i}(t) + jK_{Q_i}(t) = \frac{P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i)}{V_i^2} \quad (4.5)$$

4.1 Algorithme d'estimation des paramètres

Nous avons déjà trouvé au chapitre 3 les équations du contrôleur global linéaire représentées par les expressions suivantes :

$$E_{jdi}^g = - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (T_{4ik} \eta_k + T_{5ik} Z_k + T_{6ik} \Delta X_{3k} + T_{7ik} \dot{\eta}_k + T_{8ik} \dot{Z}_k) / T_{3i} \quad (4.6)$$

$$P_{PSVi}^g = \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^m (R_{3ik} \dot{\eta}_k + R_{4ik} \dot{Z}_{ik} + R_{5ik} \Delta \dot{X}_{3k}) \frac{T_{CHi}}{K_{HPi}} \quad (4.7)$$

Quand le point de fonctionnement du réseau électrique change, les paramètres qui apparaissent dans les équations (4.6) et (4.7) changent aussi car ils dépendent des paramètres du réseau. Pour assurer une bonne stabilité du réseau dans ces circonstances une adaptation des paramètres du contrôleur est nécessaire.

La figure A4.1 illustre la structure adaptative du contrôleur global. L'algorithme d'estimation permet de calculer les paramètres du contrôleur continuellement. Pour ce faire, nous allons passer par les étapes suivantes :

- Mesure des puissances réactive et active des charges.
- Calcul des impédances instantanées des charges à partir de l'équation (4.5).
- Calcul de la matrice d'admittance $G'_{ik} + jB'_{ik}$.
- Calcul des paramètres du contrôleur global selon les expressions présentées dans l'annexe 2.

Notons que nous avons adapté l'algorithme d'estimation utilisé dans la commande globale non linéaire [7] pour l'estimation des paramètres du contrôleur global linéaire.

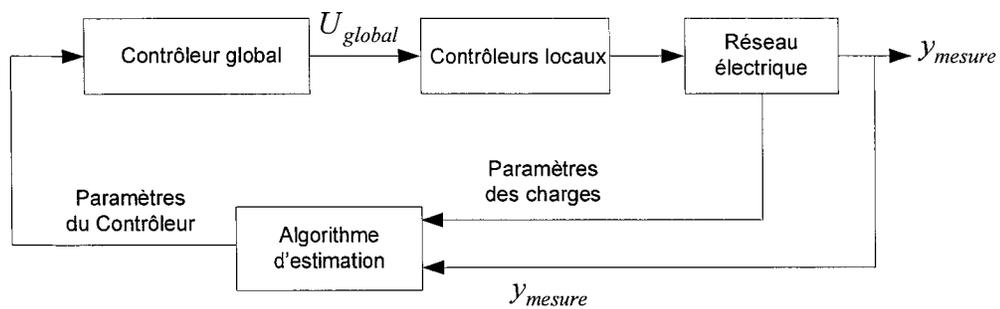


Figure A4.1 Structure adaptative du contrôleur global

4.2 Test de simulation

a) Cas sans délai

Nous allons introduire une charge dynamique dans la charge 3 de la zone 2 du réseau électrique. Nous effectuons ensuite un court-circuit triphasé aux bornes de cette charge (barre B2). Les figures A4.2 et A4.3 illustrent la comparaison de la performance du contrôleur global avec celle du contrôleur local.

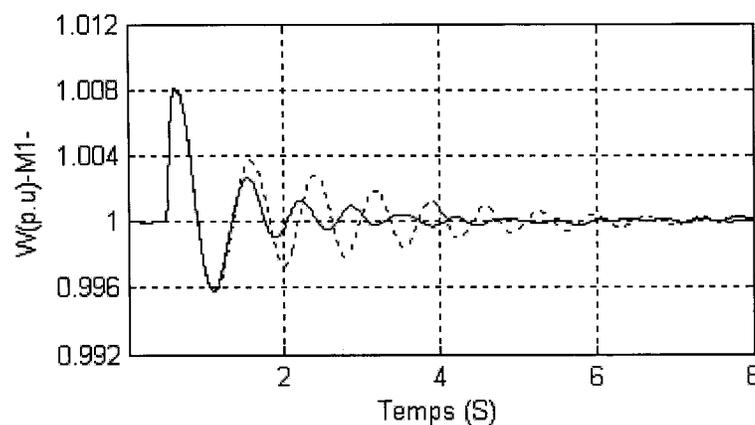


Figure A4.2 Vitesse de G1 avec les charges dynamiques (non linéaires)
Continu : régulateur global, Discontinu : régulateur local

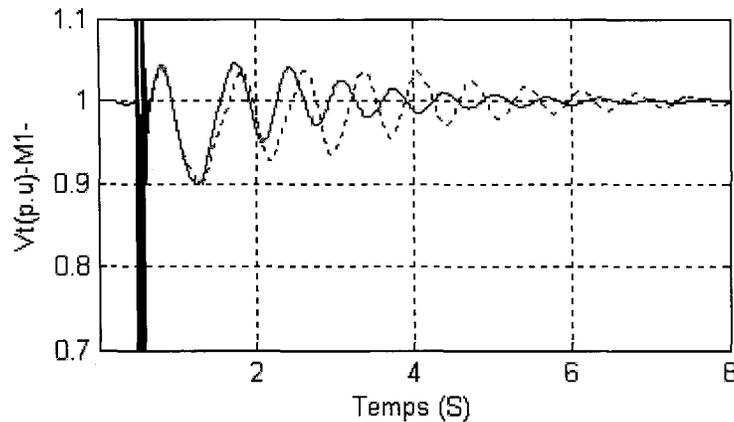


Figure A4.3 Tension de G1 avec les charges dynamiques (non linéaires)
Continu : régulateur global, Discontinu : régulateur local

Nous remarquons que malgré l'insertion des charges dynamiques le réseau électrique garde toujours sa stabilité. L'adaptation des paramètres du contrôleur global permet d'assurer son efficacité quand le point de fonctionnement du réseau change. Si les paramètres du contrôleur restent constants la performance du contrôleur global sera considérablement affectée. Le contrôleur global améliore toujours l'efficacité de l'ensemble (régulateur de tension, régulateur de vitesse et stabilisateur) et atténue les oscillations inter zones.

b) Cas avec délai

Les délais de mesure et de commande affectent considérablement l'efficacité du contrôleur global. Pour éliminer ces délais nous introduisons le prédictor présenté dans le chapitre 5. Donc en plus de l'estimation directe des paramètres du contrôleur, le prédictor permet de compenser les délais. La figure A4.4 illustre le schéma complet du contrôleur global adaptatif basé sur le prédictor de Smith. Nous effectuons le même test qu'auparavant c'est-à-dire un court-circuit triphasé aux bornes de la charge variable (à la barre B2) avec différents délais.

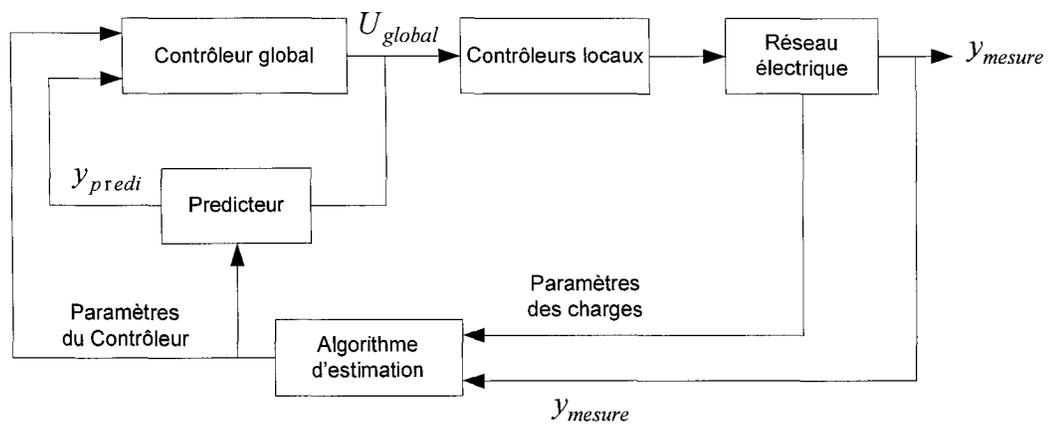


Figure A4.4 Structure adaptative du contrôleur global avec le prédicteur

Les figures A4.4 à A4.8 illustrent le comportement des sorties du réseau électrique (la vitesse du rotor et la tension terminale) en présence des délais. En trait discontinu les sorties sans prédicteur et en continu en présence du prédicteur. Nous constatons que la prédiction a permis de compenser le délai. Les sorties sont identiques à celles du cas sans délai.

1. Délai de 200ms

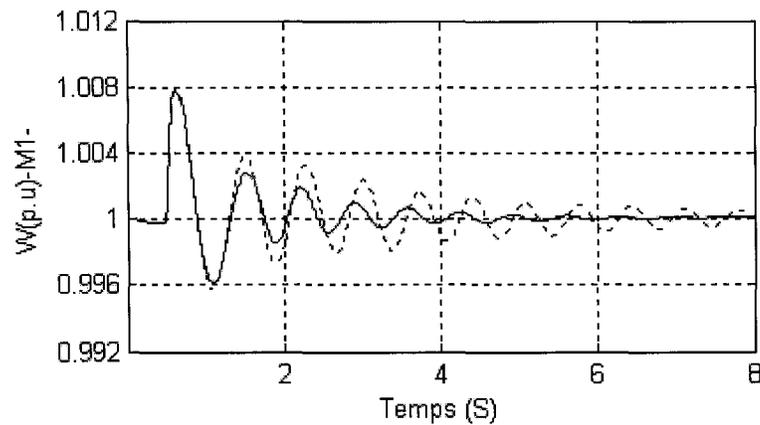


Figure A4.5 Vitesse de G1 avec les charges non linéaires et un délai de 200 ms
Continu : délai compensé, Discontinu : avec délai

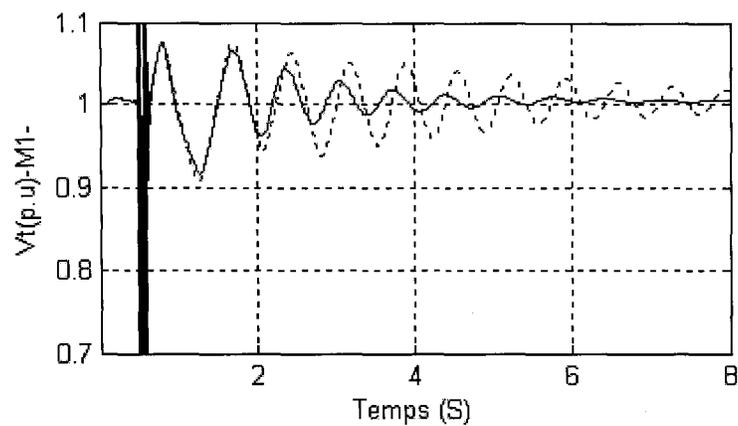


Figure A4.6 Tension de G1 avec les charges non linéaires et un délai de 200ms
Continu : délai compensé, Discontinu : avec délai

2. Délai de 400ms

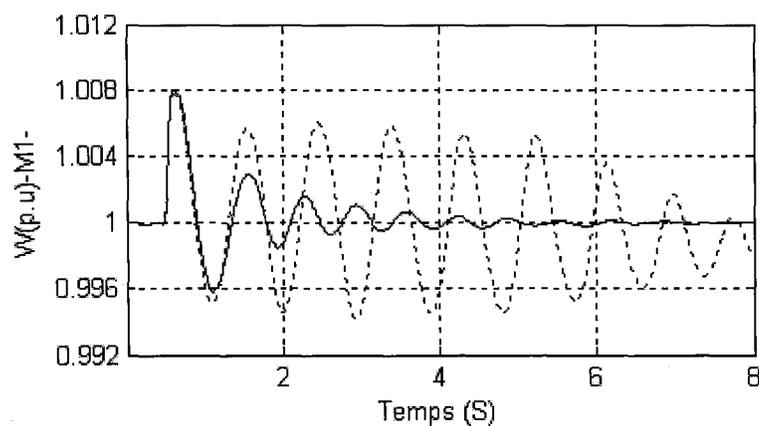


Figure A4.7 Vitesse de G1 avec les charges non linéaires et un délai de 400ms
Continu : délai compensé, Discontinu : avec délai

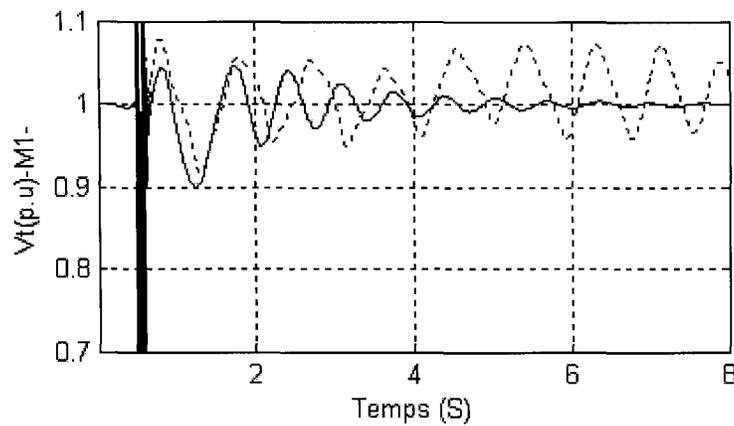


Figure A4.8 Tension de G1 avec les charges non linéaires et un délai de 400ms
Continu : délai compensé, Discontinu : avec délai

La figure A4.9 représente l'évolution d'un paramètre du contrôleur global T_{514} (T_{5ik} avec $i=1$ et $k=4$). Nous constatons que lorsque nous effectuons le court-circuit, la valeur du paramètre du contrôleur est calculée instantanément. Cette valeur change pendant le court-circuit en raison du changement du point de fonctionnement du réseau.

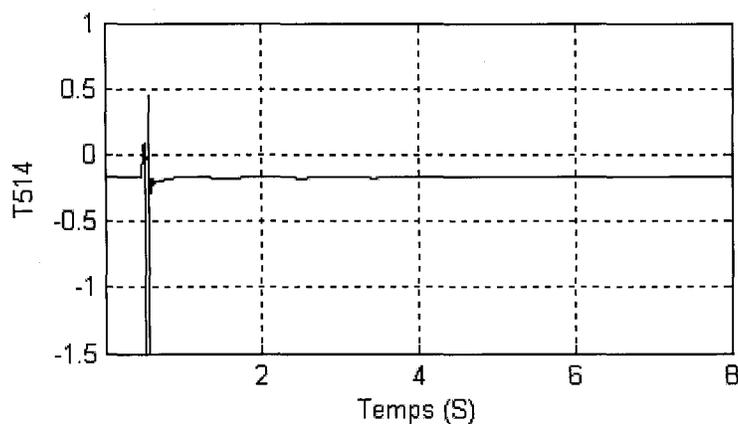


Figure A4.9 Paramètre du contrôleur global après un court-circuit à la barre B2

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kundur, P. (1994). *Power system stability and control* (McGraw -Hill Ed). New York.
- [2] Sauer M, P. A., Peter W. (1998). *Power system dynamics and stability* (Pentice Hall Ed). Hertfordshire.
- [3] Okou, F. A. (1996). *Conception d'un régulateur non linéaire de tension et d'angle de charge pour un générateur synchrone*. Mémoire de maîtrise, ETS, Montréal.
- [4] Okou, F. A. (2001). *Commande non linéaire adaptative des réseaux électriques multimachines*. Thèse de doctorat, ETS, Montréal.
- [5] Okou, A. F., Akhrif, O., & Dessaint, L. A. (2003). *Large power systems model for decentralized and hierarchical control*. The Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE.
- [6] Okou, F. A., Akhrif, O., & Dessaint, L. A. (2003). A novel modelling approach for decentralized voltage and speed control of multi-machine power systems. *International Journal of Control*, 76(8), 845-857.
- [7] Okou, F. A., Dessaint, L. A., & Akhrif, O. (2005). Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1465-1477.
- [8] Ni, H., Heydt, G. T., & Mili, L. (2002). Power system stability agents using robust wide area control. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 17(4), 1123-1131.
- [9] Aboul-Ela, M. E., Sallam, A. A., McCalley, J. D., & Fouad, A. A. (1996). Damping controller design for power system oscillations using global signals. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 11(2), 767-773.
- [10] Chapman, J. W., Ilic, M. D., King, C. A., Eng, L., & Kaufman, H. (1993). Stabilizing a multimachine power system via decentralized feedback linearizing excitation control. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 8(3), 830-839.
- [11] Kamwa, I., Grondin, R., & Hebert, Y. (2001). Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems - A decentralized/hierarchical approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(1), 136-153.

- [12] Brucoli, M., Pugliese, P., Torelli, F., & Trovato, M. (1984). Decentralized two-level excitation control of multimachine power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 6(4), 230-238.
- [13] Grondin, R., Kamwa, I., Trudel, G., Gerin-Lajoie, L., & Tabora, J. (2003, 2003//). *Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003, Toronto, Ont., Canada.
- [14] Alevisakis, G., & Seborg, D. E. (1973). An extension of the Smith predictor method to multivariable linear systems containing time delays., 17(3), 541-551.
- [15] Ni, H., & Heydt, G. T. (2002). *The impact of time delay on robust control design in power systems*. Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE.
- [16] Chaudhuri, B., Majumder, R., & Pal, B. C. (2004). Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 19(4), 1971-1979.
- [17] Wu, H., Tsakalis, K. S., & Heydt, G. T. (2004). Evaluation of time delay effects to wide area power system stabilizer design. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 1935-1941.
- [18] Wu, H., & Heydt, G. T. (2003, 2003//). *Design of delayed-input wide area power system stabilizer using the gain scheduling method*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003, Toronto, Ont., Canada.
- [19] Naduvathuparambil, B., Valenti, M. C., & Feliachi, A. (2002, 2002//). *Communication delays in wide area measurement systems*. The Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, 18-19 March 2002, Huntsville, AL, USA.
- [20] Wilson, R. E. (1994). PMUs. *IEEE Potentials*, 13(2), 26-28.
- [21] Wilson, R. E., & Sterlina, P. S. (1994). GPS synchronized power system phase angle measurements. *International Journal of Satellite Communications*, 12(5), 499-505.
- [22] Ota, Y., Ukai, H., Nakamura, K., & Fujita, H. (2000, 2000//). *Evaluation of stability and electric power quality in power system by using phasor measurements*. The Proceedings of International Conference on Power System Technology (POWERCON 2000), 4-7 Dec. 2000, Perth, WA, Australia.

- [23] Snyder, A. F., Hadjsaid, N., Georges, D., Mili, L., Phadke, A. G., Faucon, O., et al. (1998, 1998//). *Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements*. Paper presented at the Proceedings of Powercon '98, 18-21 Aug. 1998, Beijing, China.
- [24] Karlsson, D., & Hill, D. J. (1994). Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1), 157-166.