

CHAPITRE 4

REGROUPEMENT DES GÉNÉRATEURS ET PRÉSERVATION DE LA STRUCTURE DU MODÈLE

*"Tout devrait être rendu aussi simple que possible, mais pas plus simple",
Albert Einstein.*

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la procédure de regroupement des machines synchrones et leurs systèmes de commande. La méthode proposée pour calculer les paramètres équivalents est une des contributions de notre thèse, elle est basée sur le principe de la préservation de la structure du modèle des machines et des systèmes de commande. Les paramètres équivalents sont calculés directement d'une façon analytique, dans le domaine temporel. Un aperçu sur la modélisation des réseaux électriques multimachines est présenté pour expliquer la méthodologie proposée de regroupement des machines [39]. Le regroupement des machines ayant des caractéristiques différentes et les modèles des systèmes de commande différents sont analysés et discutés à la fin de ce chapitre.

4.2 Modélisation des réseaux électriques multimachines

Dans un réseau multimachines, les différents générateurs sont reliés à travers un réseau électrique constitué principalement des lignes, des transformateurs et des charges.

Le diagramme conceptuel de la figure 8 illustre bien les interactions entre les différentes grandeurs électriques et/ou mécaniques dans un réseau électrique où toutes les variables sont indiquées explicitement. Ce diagramme est utilisé dans la modélisation des réseaux électriques notamment pour les études de la stabilité transitoire. Cette représentation schématique est constituée des modèles de chaque composante du réseau, les

générateurs et leurs systèmes de commande (systèmes d'excitations, turbines et régulateurs de vitesse), le réseau constitué des lignes et des transformateurs, les charges statiques et dynamiques et autres dispositifs tels que les convertisseurs de courant continu à haute tension (CCHT) et les différents dispositifs de compensation d'énergie réactive (SVC).

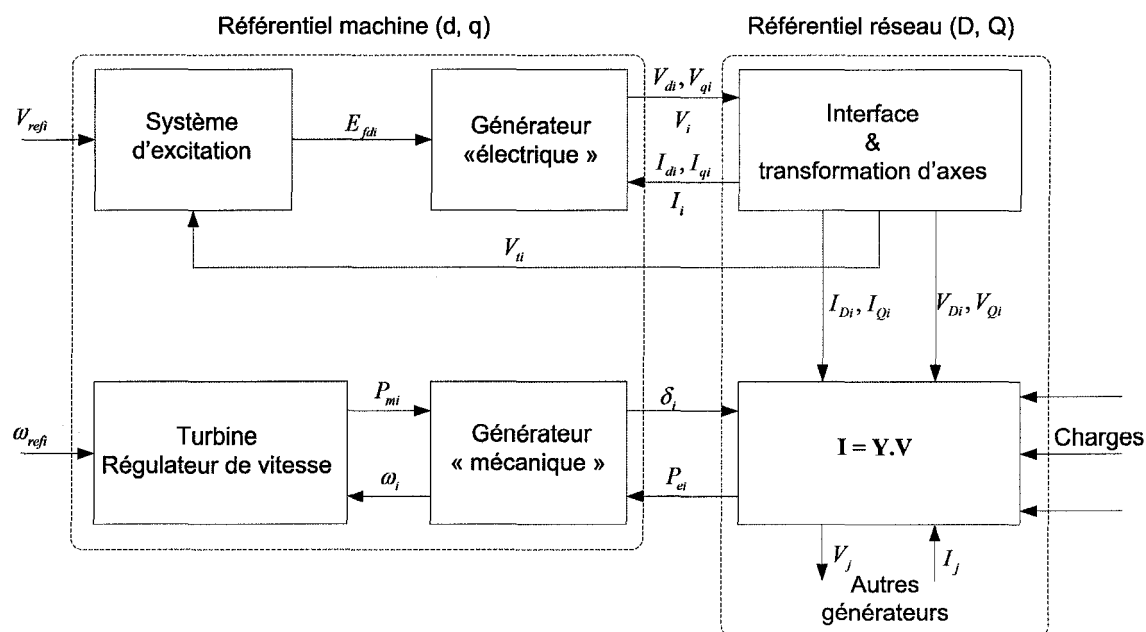


Figure 8 Diagramme conceptuel pour la modélisation des réseaux électriques

4.2.1 Transformation de référentiels

En raison des interactions entre les différentes machines, nous sommes amenés à définir un référentiel (D, Q) lié à l'ensemble des machines et tournant à la vitesse de synchronisme. Ce référentiel constitue la référence commune. Toutes les grandeurs liées à la dynamique de chaque machine prise individuellement sont exprimées dans leur propre repère (d, q), appelé repère machine alors que les grandeurs du réseau sont exprimées dans le repère commun(D, Q).

Pour illustrer le passage d'un référentiel à un autre, nous considérons un vecteur \mathbf{V}_k dans les deux systèmes de coordonnées de la figure 9 [40].

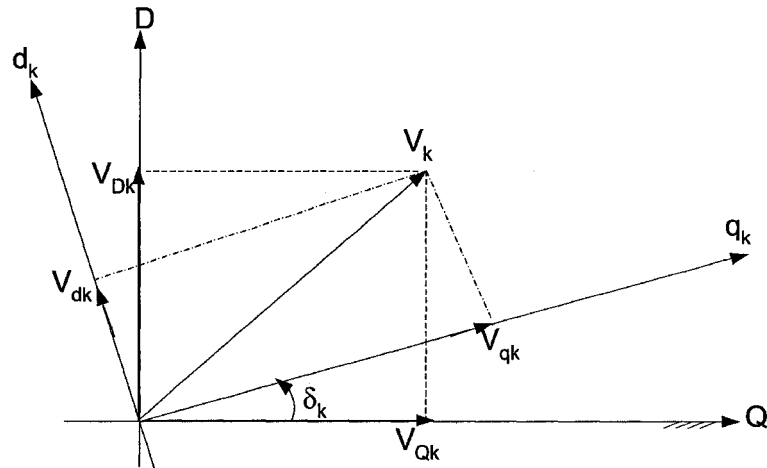


Figure 9 Transformation des référentiels

Dans le repère machine (d,q), \mathbf{V}_k s'écrit comme suit :

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{dqk} = V_{qk} + jV_{dk} \quad (4.1)$$

Dans le référentiel commun (D, Q), la tension s'écrit :

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{DQk} = V_{Qk} + jV_{Dk} \quad (4.2)$$

La figure 9 montre que l'on peut écrire :

$$\mathbf{V}_{DQk} = V_{Qk} + jV_{Dk} = (V_{qk} \cos \delta_k - V_{dk} \sin \delta_k) + j(V_{dk} \cos \delta_k + V_{qk} \sin \delta_k) \quad (4.3)$$

Pour chaque machine nous avons donc :

$$\mathbf{V}_{DQk} = \mathbf{V}_{dqk} \cdot e^{j\delta_k} \quad (4.4)$$

En notation matricielle, le changement de référentiel s'effectue selon la relation suivante

$$\mathbf{V}_{DQk} = \mathbf{T}_k \cdot \mathbf{V}_{dqk} \quad (4.5)$$

Avec :

$$T_{ii} = e^{j\delta_i} \quad (4.6)$$

Et

$$T_{ik} = 0 \quad \text{pour } i \neq k \quad (4.7)$$

Où \mathbf{T} est la matrice de transformation de référentiels ou matrice de passage.

4.2.2 Modélisation des charges

Pour une modélisation plus réaliste des charges, on tient compte de la variation des consommations actives et réactives en fonction de la fréquence et de la tension, soit des fonctions non linéaires suivantes [22] :

$$P = K_p \cdot V^{a_p} \cdot f^{a_q} \quad (4.8)$$

$$Q = K_q \cdot V^{b_p} \cdot f^{b_q} \quad (4.9)$$

Les coefficients K_p , a_p , b_p , K_q , a_q et b_q dépendent de la nature de la charge et des conditions d'équilibre.

Si $b_q = b_p = 0$, les charges ne dépendront que de la tension nodale, soit :

$$P = K_p \cdot V^{a_p} = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_p} \quad (4.10)$$

$$Q = K_q \cdot V^{a_q} = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{a_q} \quad (4.11)$$

De plus, en posant $a_p = a_q = 0$, on obtient un modèle de charge appelé modèle à puissances absorbées constantes : $P = P_0$ et $Q = Q_0$.

Si $a_p = a_q = 1$, le modèle de la charge obtenu est appelé charge à courant demandé constant. Soient :

$$P = \frac{P_0}{V_0} \cdot V \quad (4.12)$$

$$Q = \frac{Q_0}{V_0} \cdot V \quad (4.13)$$

Dont le courant consommé peut s'écrire :

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = \frac{P_0 - jQ_0}{V_0} \cdot \frac{V}{V^*} = C^{ste} \quad (4.14)$$

Enfin, pour $a_p = a_q = 2$, le modèle de la charge est dit charge statique. À défaut de connaître la nature de la charge, on fait souvent appel à la représentation statique des charges où celles-ci sont représentées par des impédances ou admittances constantes telle que :

$$Y = \frac{P - jQ}{V^2} \quad (4.15)$$

Cette dernière représentation est le modèle de charge adopté dans ce document.

4.2.3 Modélisation du réseau

Les lignes, les câbles et les transformateurs sont représentés par des éléments à admittances constantes identiques à ceux utilisés dans les calculs de répartition. L'état du réseau est décrit par des relations algébriques en phaseur comme suit :

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} \quad (4.16)$$

Où \mathbf{Y} représente la matrice admittance du réseau de dimensions $(n_{bus} \times n_{bus})$, \mathbf{I} est le vecteur des courants injectés et \mathbf{V} , le vecteur des tensions nodales. On considère, pour la suite, un réseau ayant n_{bus} nœuds (barres) comprenant n_g machines et n_{pq} charges telles que : $n_{bus} = n_g + n_{pq}$.

Cette représentation en phaseur suppose que l'on s'écarte peu de la fréquence fondamentale de 60 Hz, et que l'on ne tiendra pas compte des variations d'impédance avec la fréquence.

En distinguant les noeuds générateurs des noeuds de charges, l'équation nodale du réseau (4.16) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Avec \mathbf{I}_G et \mathbf{I}_L les vecteurs de courants injectés aux noeuds terminaux de générateurs et de charges respectivement.

En considérant les charges comme des admittances constantes, les éléments diagonaux de la matrice \mathbf{Y}_{LL0} de l'équation (4.17) sont modifiés pour inclure des admittances représentant les charges. Ainsi, on obtient :

$$\mathbf{Y}_{LL} = \mathbf{Y}_{LL0} + \begin{pmatrix} (p_1 - jq_1)/V_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & (p_{n_{pq}} - jq_{n_{pq}})/V_{n_{pq}}^2 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Les courants d'injections \mathbf{I}_L deviendront nuls et l'équation (4.17) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_G \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \mathbf{Y}_b \cdot \mathbf{V}_{bus} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Avec :

$$\mathbf{Y}_b = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Nous allons maintenant modifier cette dernière représentation pour inclure les nœuds internes des générateurs comme l'illustre la figure 10. Le système d'équation (4.19) s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gbus} \\ \mathbf{Y}_{busg} & \mathbf{Y}_{bus} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{E}_g \\ \mathbf{V}_{bus} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Avec :

$$Y_{gg}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{x'_{di}} & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.22)$$

$$Y_{gbus}(i, i) = Y_{busg}(i, i) = \begin{cases} -\frac{1}{jx'_{di}} & \text{si } i \leq n_g \\ 0 & \text{si } i > n_g \end{cases} \quad (4.23)$$

$$Y_{gbus}(i, j) = Y_{busg}(i, j) = 0 \quad \text{si } i \neq j \quad (4.24)$$

$$Y_{bus}(i, i) = \begin{cases} Y_b(i, i) + \frac{1}{jx'_{di}} & \text{pour } i \leq n_g \\ Y_b(i, i) & \text{pour } i > n_g \end{cases} \quad (4.25)$$

$$Y_{bus}(i, j) = Y_b(i, j) \quad \text{si } i \neq j \quad (4.26)$$

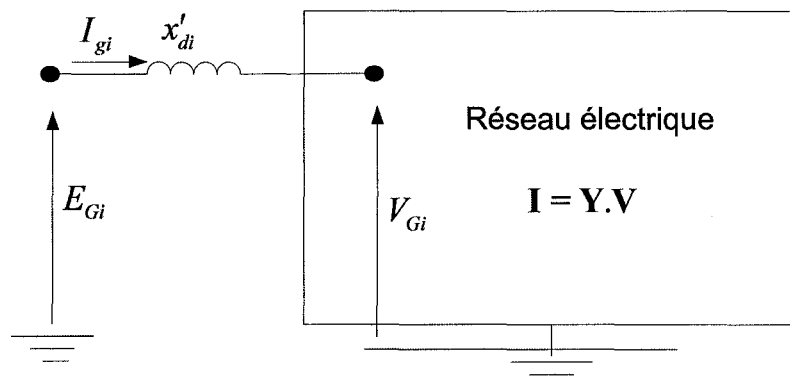


Figure 10 Représentation du réseau étendu aux noeuds internes des machines

Il faut noter que si on utilise un modèle subtransitoire pour représenter les machines, on remplace les réactances transitoires par les réactances subtransitoires dans les expressions des équations précédentes.

Les nœuds appelés "bus" renferment les nœuds terminaux des générateurs ainsi que les nœuds de charges. À partir de l'équation (4.21), on peut écrire :

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{gg} \cdot \mathbf{E}_g + \mathbf{Y}_{gbus} \cdot \mathbf{V}_{bus} \quad (4.27)$$

$$0 = \mathbf{Y}_{busg} \cdot \mathbf{E}_g + \mathbf{Y}_{bus} \cdot \mathbf{V}_{bus} \quad (4.28)$$

De l'équation (4.28), on trouve :

$$\mathbf{V}_{bus} = -\mathbf{Y}_{bus}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{busg} \cdot \mathbf{E}_g \quad (4.29)$$

Ainsi, les courants injectés aux nœuds internes des générateurs sont obtenus en substituant cette dernière expression dans l'équation (4.27), soit :

$$\mathbf{I}_g = \left(\mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gbus} \cdot \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{busg} \right) \cdot \mathbf{E}_g \quad (4.30)$$

On peut alors récrire les deux dernières équations, sous forme matricielle, comme suit :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{V}_{bus} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_g \\ \mathbf{K}_{bus} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{E}_g \quad (4.31)$$

Avec :

$$\mathbf{Y}_g = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gbus} \cdot \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{busg} \quad (4.32)$$

Et

$$\mathbf{K}_{bus} = -\mathbf{Y}_{bus}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{busg} \quad (4.33)$$

La matrice $\mathbf{Y}_g(n_g, n_g)$ est appelée matrice admittance nodale réduite aux nœuds internes des générateurs et $\mathbf{K}_{bus}(n_{bus}, n_g)$ est la matrice de reconstitution permettant d'exprimer les tensions terminales de tous les nœuds du réseau électrique en fonction des

tensions internes des générateurs. De ce fait, le courant injecté au nœud interne de chaque générateur s'écrit dans le référentiel commun comme suit :

$$\mathbf{I}_{gi} = I_{Qi} + jI_{Di} = \sum_{j=1}^{n_g} Y_{gij} \cdot E_{gj} \quad (4.34)$$

Si on considère une représentation transitoire (modèle à deux axes) pour les machines synchrones, on peut écrire :

$$E_{gi} = E'_{Qi} + jE'_{Di} \quad (4.35)$$

Et si on exprime l'admittance en coordonnées rectangulaires :

$$Y_{gij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (4.36)$$

Alors le courant injecté au nœud i du réseau s'écrit :

$$I_{gi} = \sum_{j=1}^{n_g} (G_{ij} + jB_{ij})(E'_{Qj} + jE'_{Dj}) \quad (4.37)$$

D'où :

$$I_{Qi} = \sum_{j=1}^{n_g} (G_{ij}E'_{Qj} - B_{ij}E'_{Dj}) \quad (4.38)$$

$$I_{Di} = \sum_{j=1}^{n_g} (G_{ij}E'_{Dj} + B_{ij}E'_{Qj}) \quad (4.39)$$

Rappelons qu'il est nécessaire de transformer ces expressions de courants vers le repère propre de chaque machine afin d'exprimer les équations algébriques et dynamiques dans un même repère propre à chaque machine. Pour ce faire, on utilise la transformation de coordonnées définie auparavant dans l'équation (4.5) dont la forme rectangulaire, est :

$$\mathbf{T}_k = \begin{pmatrix} \cos \delta_k & \sin \delta_k \\ -\sin \delta_k & \cos \delta_k \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

L'angle δ_k définit la position de l'axe q_k de la k^{eme} machine par rapport au référentiel commun. La matrice de transformation \mathbf{T}_k est orthogonale (i.e., $\mathbf{T}_k^{-1} = \mathbf{T}_k^*$) [40]. On peut écrire alors :

$$\begin{aligned} E'_{Qj} &= E'_{qj} \cos \delta_j - E'_{dj} \sin \delta_j \\ E'_{Dj} &= E'_{qj} \sin \delta_j + E'_{dj} \cos \delta_j \end{aligned} \quad (4.41)$$

De même pour le courant :

$$\begin{aligned} I_{qi} &= I_{Qi} \cos \delta_i + I_{Di} \sin \delta_i \\ I_{di} &= -I_{Qi} \sin \delta_i + I_{Di} \cos \delta_i \end{aligned} \quad (4.42)$$

Dans le repère machine (d, q), les expressions des courants injectés deviennent :

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^m (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) E'_{qj} - (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) E'_{dj} \quad (4.43)$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^m (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) E'_{qj} + (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) E'_{dj} \quad (4.44)$$

Avec

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (4.45)$$

Pour une modélisation complète du réseau, les équations algébriques du réseau (4.43) et (4.44) sont ajoutées aux équations dynamiques représentant les machines électriques.

4.2.4 Modélisation des machines

Une machine synchrone a essentiellement trois caractéristiques fondamentales qui doivent être représentées dans un modèle dynamique. Ce sont la dynamique de l'enroulement d'excitation, la dynamique des enroulements amortisseurs, et la dynamique de l'arbre. À partir de ces caractéristiques, on peut définir une multitude de modèles, chacun est défini par son domaine de validité adapté au besoin de l'étude.

Dans ce document, nous avons considéré le modèle transitoire, appelé modèle à deux axes, pour représenter les dynamiques électriques des machines synchrones. Ce choix est motivé par sa simplicité permettant d'expliquer clairement la procédure de regroupement des machines et le calcul des paramètres équivalents. Cependant, pour toute autre représentation des machines, la procédure de regroupement reste valide.

Le modèle à deux axes, dans le domaine temporel, est décrit par les équations dynamiques suivantes [38] :

$$\dot{\delta}_i = \Delta\omega_i \quad (4.46)$$

$$M_i \cdot \Delta\dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - D_i \Delta\omega_i \quad (4.47)$$

$$T'_{d0i} \dot{E}'_{qi} = -E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di} + E_{fdi} \quad (4.48)$$

$$T'_{q0i} \dot{E}'_{di} = -E'_{di} - (x_{qi} - x'_{qi}) I_{qi} \quad (4.49)$$

Dans ce modèle, la machine synchrone est représentée par les f.e.m transitoires E'_q et E'_d derrière les réactances transitoires d'axe q et d respectivement. Elles sont définies par les composantes directe et quadratique de la tension terminale de la machine comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{di} \\ V_{qi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E'_{di} \\ E'_{qi} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & x'_{qi} \\ -x'_{di} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

La puissance active générée par chaque machine s'écrit alors :

$$P_{ei} = E'_{qi} I_{qi} + E'_{di} I_{di} + (x'_{di} - x'_{qi}) I_{qi} \cdot I_{di} \quad (4.51)$$

4.3 Regroupement générateurs

Le regroupement des générateurs consiste à remplacer un groupe de générateurs cohérents par un générateur équivalent et ses systèmes de commandes équivalents. Le générateur équivalent est représenté soit par un modèle classique ou par un modèle

détaillé. Dans sa forme la plus simple, l'inertie du générateur équivalent est la somme des inerties de tous les générateurs regroupés, sa réactance transitoire est obtenue par la mise en parallèle des réactances transitoires de tous les générateurs considérés.

Souvent, le regroupement classique est utilisé pour sa simplicité et le gain en temps de calcul mais aussi pour ses performances comparables à celles d'un regroupement détaillé. En fait, la représentation détaillée n'est requise que pour les études de certains phénomènes telles que les oscillations interzones dans les réseaux interconnectés ou les études de l'influence des systèmes de commande dans la stabilité des réseaux électriques. La présence, dans ce cas, des systèmes de réglage et des stabilisateurs de puissance est indispensable. Les paramètres des systèmes équivalents, essentiellement, des gains et des constantes de temps sont souvent déterminés par des méthodes d'identification dans le domaine fréquentiel et dans un processus itératif.

La méthode de regroupement développée dans ce document utilise un processus non itératif pour déterminer les paramètres équivalents du générateur. Elle est basée sur la préservation de la structure des coefficients des matrices représentant les modèles des générateurs dans le domaine temporel [6]. Les paramètres équivalents du système de commande incluant le système d'excitation, la turbine, le régulateur de vitesse et le système stabilisateur de puissance, sont déterminés en utilisant ce même principe de la préservation de la structure physique du modèle en considérant, néanmoins, que les parties linéaires des modèles.

La méthode de regroupement que nous proposons nécessite beaucoup moins de temps de calcul que la plupart des méthodes connues qui sont le plus souvent réalisées dans le domaine fréquentiel en faisant appel à l'identification des paramètres [4] [29].

Pour appliquer la méthode, on suppose que toutes les machines cohérentes sont représentées par des modèles ayant des structures identiques. Le modèle équivalent des

machines cohérentes est alors construit sur la base de la même structure que celles représentées dans les équations (4.46) à (4.50).

Dans ce qui suit, nous considérons m machines cohérentes à regrouper. En utilisant l'équation (4.50), les courants injectés par la $i^{\text{ème}}$ machine exprimés dans le référentiel propre de la machine (d_i, q_i) sont donnés par :

$$\begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1/x'_{di} \\ -1/x'_{qi} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{di} \\ V_{qi} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1/x'_{di} \\ -1/x'_{qi} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E'_{di} \\ E'_{qi} \end{pmatrix} \quad (4.52)$$

Où, sous la forme matricielle comme suit :

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{A}'_i \cdot \mathbf{V}_i - \mathbf{A}'_i \cdot \mathbf{E}'_i \quad (4.53)$$

L'équation correspondante pour la machine équivalente devra, selon le principe de préservation de la structure, avoir la forme suivante :

$$\mathbf{I}_e = \mathbf{A}'_e \cdot \mathbf{V}_e - \mathbf{A}'_e \cdot \mathbf{E}'_e \quad (4.54)$$

Où \mathbf{A}'_e doit avoir la même structure que la matrice \mathbf{A}'_i définie en (4.53). \mathbf{I}_e est le courant injecté par la machine équivalente, il est exprimé dans le référentiel propre de la machine équivalente (d_e, q_e) .

Dans le référentiel commun du réseau, le courant injecté par la machine équivalente est égal à la somme des courants injectés par les machines cohérentes et s'écrit :

$$\mathbf{I}_{DQe} = \sum_{k=1}^m \mathbf{I}_{DQk} = \sum_{k=1}^m (\mathbf{T}_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{T}_k^{-1} \cdot \alpha_k) \mathbf{V}_{DQe} - \sum_{k=1}^m \mathbf{T}_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{E}'_{dqk} \quad (4.55)$$

Où α_k est l'amplitude du rapport de transformation entre le nœud terminal \mathbf{k} du groupe cohérent et le nœud terminal de la machine équivalente comme il a été déjà défini dans l'équation (3.5) du chapitre précédent.

L'équation (4.55) exprimée dans le référentiel de la machine équivalente devient :

$$\mathbf{I}_e = \sum_{k=1}^m \mathbf{a}_k (\mathbf{P}_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{P}_k^{-1}) \mathbf{V}_e - \sum_{k=1}^m \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{E}'_{dqk} \quad (4.56)$$

Où

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{T}_e^{-1} \cdot \mathbf{T}_k = \begin{pmatrix} \cos(\delta_k - \delta_e) & \sin(\delta_k - \delta_e) \\ -\sin(\delta_k - \delta_e) & \cos(\delta_k - \delta_e) \end{pmatrix} \quad (4.57)$$

Par conséquent :

$$\mathbf{A}'_e = \sum_{k=1}^m \mathbf{a}_k \cdot (\mathbf{P}_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{P}_k^{-1}) \quad (4.58)$$

Et

$$A'_{e11} = -A'_{e22} = (1/2) \cdot \sum_{k=1}^m a_k \cdot (1/x'_{dk} - 1/x'_{qk}) \sin 2(\delta_k - \delta_e) \quad (4.59)$$

$$A'_{e12} = \sum_{k=1}^m a_k \cdot (\cos^2(\delta_k - \delta_e)/x'_{dk} + \sin^2(\delta_k - \delta_e)/x'_{qk}) \quad (4.60)$$

$$A'_{e21} = -\sum_{k=1}^m a_k \cdot (\cos^2(\delta_k - \delta_e)/x'_{qk} + \sin^2(\delta_k - \delta_e)/x'_{dk}) \quad (4.61)$$

Le principe de la préservation de la structure physique de la matrice \mathbf{A}'_e force les éléments diagonaux A'_{e11} et A'_{e22} à être nuls. Cette contrainte permet de déterminer l'angle interne de la machine équivalente. En effet, à partir de l'équation (4.59), on peut déduire :

$$\text{tg} 2\delta_e = \frac{\sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{1}{x'_{dk}} - \frac{1}{x'_{qk}} \right) \sin 2\delta_k}{\sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{1}{x'_{dk}} + \frac{1}{x'_{qk}} \right) \cos 2\delta_k} \quad (4.62)$$

Cet angle représente l'angle interne de la machine équivalente. Il est parfois calculé en utilisant la notion du centre des angles (ou COA pour Centre Of Angles) qui représente la moyenne pondérée dans angles des machines équivalentes par rapport à leurs inerties respectives [41] :

$$C.O.A = \frac{\sum_{k=1}^m M_k \delta_k}{\sum_{k=1}^m M_k} \quad (4.63)$$

4.3.1 Calcul des réactances transitoires équivalentes

À partir des résultats obtenus dans la section précédente, les réactances transitoires équivalentes représentent les termes non diagonaux de la matrice \mathbf{A}'_e de l'équation (4.58), soient :

$$x'_{de} = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e))}{x'_{dk}} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x'_{qk}} \right) \quad (4.64)$$

$$x'_{qe} = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e))}{x'_{qk}} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x'_{dk}} \right) \quad (4.65)$$

On remarque que les réactances transitoires équivalentes sont des fonctions du terme $(\delta_k - \delta_e)$ qui représente la différence entre les angles internes des machines cohérentes et celui de la machine équivalente. Sachant que, par définition, la différence entre les angles internes des machines cohérentes reste sensiblement constant et du fait que la machine équivalente est elle-même cohérente avec le groupe de machines qu'elle représente on conclut que les termes $(\delta_k - \delta_e)$ vont demeurer sensiblement constants en régime dynamique.

Par ailleurs, les réactances équivalentes dépendent également des modules des rapports de transformation a_k . Ces rapports sont théoriquement des valeurs complexes, cependant, leurs parties imaginaires sont négligeables devant leurs parties réelles, c'est pourquoi, seul leurs modules sont pris en considération.

De ce fait, la méthode de regroupement que nous proposons met en évidence l'influence de la topologie et des conditions initiales du réseau original sur les paramètres équivalents des machines. Elle tient compte de la localisation des machines à regrouper dans le réseau, contrairement à la plupart des méthodes dans cette catégorie qui considèrent les machines cohérentes ayant des tensions terminales identiques, autrement dit, toutes les machines cohérentes sont considérées connectées à la même barre du réseau [6].

4.3.2 Calcul des réactances synchrones équivalentes

La même procédure que précédemment est suivie pour évaluer les réactances synchrones x_{de} et x_{qe} . On remplacera, cependant, l'équation (4.50) par l'expression qui donne les composantes directes et quadratiques de la tension terminale en fonction des mêmes composantes de la f.e.m synchrone, soit :

$$\begin{pmatrix} V_{di} \\ V_{qi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{di} \\ E_{qi} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & x_{qi} \\ -x_{di} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{pmatrix} \quad (4.66)$$

En utilisant cette dernière équation, les courants injectés par la $i^{\text{ème}}$ machine exprimés dans le référentiel propre de la machine (d_k, q_k) sont donnés par :

$$\begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1/x_{di} \\ -1/x_{qi} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{di} \\ V_{qi} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1/x_{di} \\ -1/x_{qi} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{di} \\ E_{qi} \end{pmatrix} \quad (4.67)$$

Ou, sous la forme matricielle comme suit :

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{V}_i - \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{E}_i \quad (4.68)$$

On aboutit finalement aux expressions des réactances synchrones similaires à celles des réactances transitoires :

$$x_{de} = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e) + \sin^2(\delta_k - \delta_e))}{x_{dk}} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x_{qk}} \right) \quad (4.69)$$

$$x_{qe} = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e) + \sin^2(\delta_k - \delta_e))}{x_{qk}} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x_{dk}} \right) \quad (4.70)$$

Pour évaluer les réactances subtransitoires équivalentes x_{de}'' et x_{qe}'' . On procédera de la même façon que précédemment en exprimant la tension terminale en fonction des f.e.m subtransitoires comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{di} \\ V_{qi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{di}'' \\ E_{qi}'' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & x_{qi}'' \\ -x_{di}'' & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{pmatrix} \quad (4.71)$$

On aboutit finalement à :

$$x_{de}'' = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e) + \sin^2(\delta_k - \delta_e))}{x_{dk}''} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x_{qk}''} \right) \quad (4.72)$$

$$x_{qe}'' = 1 / \sum_{k=1}^m a_k \left(\frac{(\cos^2(\delta_k - \delta_e) + \sin^2(\delta_k - \delta_e))}{x_{qk}''} + \frac{\sin^2(\delta_k - \delta_e)}{x_{dk}''} \right) \quad (4.73)$$

4.3.3 Calcul des constantes de temps équivalentes

Les constantes de temps équivalentes transitoires du circuit ouvert sont obtenues par le regroupement des variables d'état des machines cohérentes. En combinant les équations (4.48), (4.49) et (4.52), le modèle de la $i^{\text{ème}}$ machine s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_{di}' \\ \dot{E}_{qi}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_{q0i}' & 0 \\ 0 & -1/T_{d0i}' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{di} \\ E_{qi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/T_{d0i}' \end{pmatrix} E_{fdi} \quad (4.74)$$

Cette équation devient en forme matricielle :

$$\dot{\mathbf{E}}'_i = \mathbf{C}_i \mathbf{E}_i + \mathbf{D}_i \mathbf{E}_{fdi} \quad (4.75)$$

L'équation correspondante à la machine équivalente peut s'écrire :

$$\dot{\mathbf{E}}'_e = \mathbf{C}_e \mathbf{E}_e + \mathbf{D}_e \mathbf{E}_{fde} \quad (4.76)$$

La matrice de regroupement des variables $[\mathbf{E}'_1 \dots \mathbf{E}'_m]$ est obtenue en égalisant les deuxièmes membres des équations (4.54) et (4.56), soit :

$$\mathbf{A}'_e \cdot \mathbf{E}'_e = \sum_{k=1}^m \mathbf{P}'_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{E}'_{dqk} \quad (4.77)$$

d'où

$$\mathbf{E}'_e = \mathbf{A}'_e{}^{-1} \cdot \sum_{k=1}^m \mathbf{P}'_k \cdot \mathbf{A}'_k \cdot \mathbf{E}'_{dqk} = \sum_{k=1}^m \mathbf{N}'_k \cdot \mathbf{E}'_{dqk} \quad (4.78)$$

Avec :

$$\mathbf{N}'_k = \mathbf{A}'_e{}^{-1} \cdot \mathbf{P}'_k \cdot \mathbf{A}'_k \quad (4.79)$$

La même procédure peut être utilisée pour déterminer la matrice de regroupement des variables $[\mathbf{E}_1 \dots \mathbf{E}_m]$, soit :

$$\mathbf{N}_k = \mathbf{A}_e{}^{-1} \cdot \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{A}_k \quad (4.80)$$

Les matrices de regroupement \mathbf{N}_k et \mathbf{N}'_k sont traitées comme des matrices à paramètres constants du fait que les termes $(\delta_k - \delta_e)$ sont pratiquement constants comme nous l'avons expliqué auparavant. À cet effet, la dérivée par rapport au temps des deux membres de l'équation (4.78) donne :

$$\dot{\mathbf{E}}'_e = \sum_{k=1}^m \mathbf{N}'_k \cdot \dot{\mathbf{E}}'_{dqk} \quad (4.81)$$

En utilisant l'équation (4.75), on déduit que le modèle composé, constitué de m machines cohérentes, est obtenu par l'assemblage des composantes des modèles d'état de chaque machine pour aboutir à des matrices d'état diagonales par blocs :

$$\begin{pmatrix} [\dot{\mathbf{E}}'_1] \\ \vdots \\ [\dot{\mathbf{E}}'_m] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\mathbf{C}_1] & \dots & [0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \dots & [\mathbf{C}_m] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [\mathbf{E}_1] \\ \vdots \\ [\mathbf{E}_m] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [\mathbf{D}_1] & \dots & [0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \dots & [\mathbf{D}_m] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{fd1} \\ \vdots \\ E_{fdm} \end{pmatrix} \quad (4.82)$$

Les sous matrices (ou blocs de matrices) \mathbf{C}_k et \mathbf{D}_k sont similaires à celles définies dans l'équation (4.74) pour une seule machine. En substituant l'équation (4.82) dans l'équation (4.81), on obtient :

$$\dot{\mathbf{E}}'_e = ([\mathbf{N}'_1] \dots [\mathbf{N}'_m]) \cdot \begin{pmatrix} [\mathbf{C}_1] & \dots & [0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \dots & [\mathbf{C}_m] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [\mathbf{E}_1] \\ \vdots \\ [\mathbf{E}_m] \end{pmatrix} + ([\mathbf{N}'_1] \dots [\mathbf{N}'_m]) \cdot \begin{pmatrix} [\mathbf{D}_1] & \dots & [0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \dots & [\mathbf{D}_m] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{fd1} \\ \vdots \\ E_{fdm} \end{pmatrix} \quad (4.83)$$

Par ailleurs, le vecteur $[\mathbf{E}_1 \dots \mathbf{E}_m]$ peut être exprimé en termes du vecteur \mathbf{E}_e selon l'équation (4.80) :

$$\begin{pmatrix} [\mathbf{E}_1] \\ \vdots \\ [\mathbf{E}_m] \end{pmatrix} = ([\mathbf{N}_1] \dots [\mathbf{N}_m])^R \cdot [\mathbf{E}_e] \quad (4.84)$$

L'exposant « R » indique la pseudo inverse de la matrice à droite.

En substituant (4.84) dans (4.83), on obtient :

$$\begin{aligned} [\dot{\mathbf{E}}'_e] &= ([\mathbf{N}'_1][\mathbf{C}_1] \dots [\mathbf{N}'_m][\mathbf{C}_m]) \cdot ([\mathbf{N}_1] \dots [\mathbf{N}_m])^R [\mathbf{E}_e] \\ &\quad + ([\mathbf{N}'_1][\mathbf{D}_1] \dots [\mathbf{N}'_m][\mathbf{D}_m]) \cdot (E_{fd1} \dots E_{fdm})' \end{aligned} \quad (4.85)$$

Et en comparant (4.85) à (4.76), on trouve :

$$[\mathbf{C}_e] = ([\mathbf{N}'_1][\mathbf{C}_1] \cdots [\mathbf{N}'_m][\mathbf{C}_m]) \cdot ([\mathbf{N}_1] \cdots [\mathbf{N}_m])^R \quad (4.86)$$

$$[\mathbf{D}_e] = ([\mathbf{N}'_1][\mathbf{D}_1] \cdots [\mathbf{N}'_m][\mathbf{D}_m]) \quad (4.87)$$

On sait bien que la pseudo inverse d'une matrice rectangulaire quelconque \mathbf{L} n'est pas unique. Néanmoins, une des solutions optimales est obtenue par la minimisation du critère quadratique (critère des moindres carrés). Cette solution est unique, elle est obtenue par la formule de la pseudo inverse minimale donnée par [6] :

$$\mathbf{L}^{RM} = \mathbf{L}' \cdot [\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}']^{-1} \quad (4.88)$$

Le second membre de l'équation (4.86) est calculé de façon à contraindre la structure de la matrice \mathbf{C}_e à être diagonale. Ce qui permet d'identifier aisément ses éléments diagonaux comme étant des réciproques des constantes de temps équivalentes du circuit ouvert, soient :

$$T'_{d0e} = -1/C_{e22} \quad (4.89)$$

$$T'_{q0e} = -1/C_{e11} \quad (4.90)$$

4.3.4 Calcul des constantes d'inertie et d'amortissement équivalentes

L'équation du mouvement du groupe de machines cohérentes peut être obtenue à partir de l'équation (4.47) en admettant que toutes les machines du même groupe cohérent ont des écarts de vitesse semblable, soit :

$$\left(\sum_{k=1}^m 2H_k \right) \cdot \Delta \dot{\omega} = \sum_{k=1}^m P_{mk} - \sum_{k=1}^m P_{ek} - \left(\sum_{k=1}^m D_k \right) \cdot \Delta \omega \quad (4.91)$$

les paramètres équivalents représentant la constante d'inertie et la constante d'amortissement de la machine équivalente sont données par rapport à la base MVA du système comme suit :

$$H_e = \sum_{k=1}^m H_k \quad (4.92)$$

$$D_e = \sum_{k=1}^m D_k \quad (4.93)$$

4.4 Regroupement des systèmes d'excitation

Le regroupement des systèmes de commande tels que les systèmes d'excitation les turbines et régulateurs de vitesse ainsi que les stabilisateurs de puissance est basé sur la combinaison de deux principes, le principe de préservation de la structure des modèles tel que présenté dans la section précédente et le principe du regroupement linéaire qui utilise les modèles composés pour déterminer le modèle équivalent.

Dans notre analyse, le système d'excitation IEEE-type1, non saturé, est utilisé comme modèle de base pour équiper tous les générateurs [40]. Il est représenté par le diagramme block de la figure11. Ce modèle est pris comme exemple pour illustrer la procédure de regroupement.

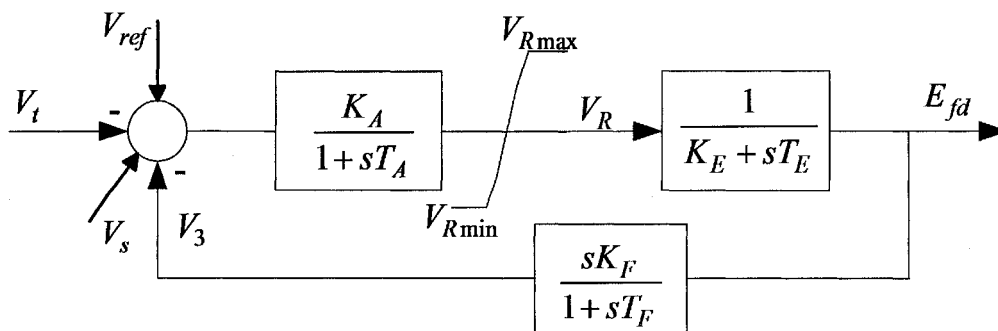


Figure 11 Système d'excitation IEEE type 1

Il y a principalement 3 catégories de modèles de systèmes d'excitation recommandés par IEEE pour des études de stabilité des réseaux électriques, les types DC, AC et ST [7]. Ces types sont définis selon la nature de la source de l'excitatrice. Dans chaque catégorie, divers modèles existent, le type 1 décrit ci-dessus est le type DCA1 qui est le modèle plus utilisé dans l'industrie et parfois utilisé pour représenter d'autres types de systèmes d'excitation quand les données détaillées ne sont pas disponibles ou lorsque le modèle simplifié est recommandé. Seules des machines avec la même catégorie de systèmes d'excitation sont regroupées.

La représentation d'état linéaire du système d'excitation est donnée par le système d'équation suivant :

$$\dot{V}_{3i} = \left(-V_{3i} + (K_{Fi} / T_{Ei}) (V_{Ri} - K_{Ei} E_{fdi}) \right) / T_{Fi} \quad (4.94)$$

$$\dot{V}_{Ri} = \left(-V_{Ri} + K_{Ai} V_{3i} + K_{Ai} \Delta V_{ti} \right) / T_{Ai} \quad (4.95)$$

$$\dot{E}_{fdi} = \left(-K_{Ei} E_{fdi} + V_{Ri} \right) / T_{Ei} \quad (4.96)$$

Et

$$\Delta V_{ti} = V_{refi} + V_{si} - V_{ti} \quad (4.97)$$

Sous la forme matricielle, on écrit :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{exi} &= \mathbf{A}_{exi} \cdot \mathbf{X}_{exi} + \mathbf{B}_{exi} \cdot \Delta V_{ti} \\ E_{fdi} &= \mathbf{C}_{exi} \cdot \mathbf{X}_{exi} \end{aligned} \quad (4.98)$$

La représentation d'état correspondante au système d'excitation équivalent est :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{exe} &= \mathbf{A}_{exe} \cdot \mathbf{X}_{exe} + \mathbf{B}_{exe} \cdot \Delta V_{te} \\ E_{fde} &= \mathbf{C}_{exe} \cdot \mathbf{X}_{exe} \end{aligned} \quad (4.99)$$

Où :

$$A_{exe} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_{Fe}} & \frac{K_{Fe}}{T_{Ee}T_{Fe}} & -\frac{K_{Ee}K_{Fe}}{T_{Ee}T_{Fe}} \\ -\frac{K_{Ae}}{T_{Ae}} & -\frac{1}{T_{Ae}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{Ee}} & -\frac{K_{Ee}}{T_{Ee}} \end{pmatrix} \quad (4.100)$$

$$B_{exe} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_{Ae}}{T_{Ae}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.101)$$

$$C_{exe} = (0 \quad 0 \quad 1) \quad (4.102)$$

En considérant les contraintes structurelles des matrices de coefficients définies dans les équations (4.100), (4.101) et (4.102) d'une part, et en utilisant, d'autre part, le principe de regroupement linéaire du modèle composé de \mathbf{m} systèmes d'excitation, on obtient :

$$\mathbf{A}_{exe} = \mathbf{L} \cdot \text{diag}(\mathbf{A}_{ex1}, \mathbf{A}_{ex2} \cdots \mathbf{A}_{exm}) \cdot \mathbf{L}' \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}')^{-1} \quad (4.103)$$

$$\mathbf{B}_{exe} = \mathbf{L} \cdot (\mathbf{B}_{ex1}, \mathbf{B}_{ex2} \cdots \mathbf{B}_{exm})' \quad (4.104)$$

$$\mathbf{C}_{exe} = (0 \quad 0 \quad 1) \quad (4.105)$$

Où

$$\mathbf{L} = ([\mathbf{L}_1], [\mathbf{L}_2], \cdots, [\mathbf{L}_m]) \quad (4.106)$$

$$\mathbf{L}_k = \text{diag}(l_{k11} \quad l_{k22} \quad l_{k33}) \quad (4.107)$$

l_{k33} sont des pondérations relatives reliant la variable représentant la tension d'excitation équivalente E_{jde} aux tensions d'excitations des machines individuelles E_{jdk} . Le diagramme de la figure 12 permet d'illustrer le regroupement de deux systèmes d'excitation avec leurs pondérations respectives. Celles-ci sont déduites directement à partir du deuxième membre de l'équation (4.85) :

$$l_{k33} = T'_{d0e} \cdot x'_{d0e} \cdot \cos(\delta_k - \delta_e) / (x'_{dk} \cdot T'_{d0k}) \quad (4.108)$$

L est appelée matrice de composition des modèles (ou matrice d'agrégation), elle est choisie de telle sorte qu'elle soit une matrice diagonale par blocs afin de pouvoir regrouper les mêmes variables de chaque groupe de machines cohérentes.

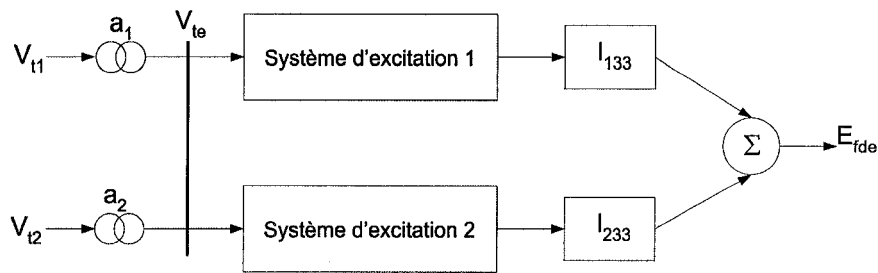


Figure 12 Diagramme de regroupement de deux systèmes d'excitation

On peut aisément constater que la matrice \mathbf{L} , pour le modèle du système d'excitation (4.98), est composée de m blocs \mathbf{L}_k , chacun de dimensions 3×3 , soit :

$$\mathbf{L} = \left(\left[\begin{array}{ccc} l_{111} & 0 & 0 \\ 0 & l_{122} & 0 \\ 0 & 0 & l_{133} \end{array} \right]_1 \dots \dots \left[\begin{array}{ccc} l_{m11} & 0 & 0 \\ 0 & l_{m22} & 0 \\ 0 & 0 & l_{m33} \end{array} \right]_m \right) \quad (4.109)$$

Les coefficients l_{kii} sont des poids relatifs des variables d'état de chaque système d'excitation. En particulier, pour certaines variables, ces coefficients peuvent être choisis comme des pondérations relatives aux rapports de transformation entre les barres terminales des machines cohérentes et la barre terminale de la machine équivalente. Ils sont définis alors comme suit :

$$l_{kii} = \alpha_k^2 / \sum_{i=1}^m \alpha_i^2 \quad (4.110)$$

Pour les autre variables, ces coefficients sont choisis comme des poids relatifs reliant la puissance apparente de base de chaque générateur à la puissance apparente de base du générateur équivalent tel que :

$$l_{kii} = S_{bk} / \sum_{i=1}^m S_{bi} \quad (4.111)$$

En respectant la structure du modèle du système d'excitation de toutes les machines (4.98), les paramètres du système équivalent sont calculés en utilisant les équations (4.103) et (4.104) comme suit :

$$1/T_{Fe} = \sum_{k=1}^m (a_k^2 / T_{Fk}) / \sum_{k=1}^m a_k^2 \quad (4.112)$$

$$1/T_{Ae} = \sum_{k=1}^m (a_k^2 / T_{Ak}) / \sum_{k=1}^m a_k^2 \quad (4.113)$$

$$1/T_{Ee} = \sum_{k=1}^m ((l_{k22} \cdot l_{k33}) / T_{Ek}) / \sum_{k=1}^m l_{k22}^2 \quad (4.114)$$

$$K_{Ee} / T_{Ee} = \sum_{k=1}^m ((l_{k33}^2 K_{Ek}) / T_{Ek}) / \sum_{k=1}^m l_{k33}^2 \quad (4.115)$$

$$K_{Fe} / (T_{Fe} T_{Ee}) = \sum_{k=1}^m a_k l_{k22} (K_{Fk} / T_{Fk} T_{Ek}) / \left(\sum_{k=1}^m a_k^2 \cdot \sum_{k=1}^m l_{k22}^2 \right) \quad (4.116)$$

Les limites minimale et maximale du régulateur de tension équivalent V_{Remin} et V_{Remax} sont calculées en appliquant simultanément une entrée échelon égale à la valeur limite V_{Remin} ou V_{Remax} à chaque système d'excitation comme l'illustre la figure 13 [4].

$$E_{fdk}(s) = \frac{1}{K_{Ek} + sT_{Ek}} V_{Rk}(s) \quad (4.117)$$

Alors, pour une entrée échelon définie par:

$$V_{Rk}(s) = \frac{V_{Rkmax}}{s} \quad (4.118)$$

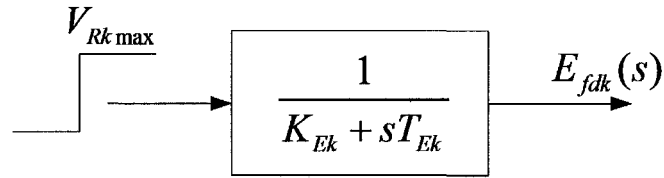


Figure 13 Diagramme de calcul des valeurs limites équivalentes

La sortie serait :

$$E_{fdk}(s) = \frac{1}{s} \frac{V_{Rk \max}}{K_{Ek} + sT_{Ek}} \quad (4.119)$$

Selon les équations (4.104) et (4.107), l'expression de la tension d'excitation équivalente en fonction des tensions d'excitations des machines individuelles s'écrit [4]:

$$E_{fde} = \sum_{k=1}^m l_{k33} \cdot E_{fdk} \quad (4.120)$$

En utilisant cette dernière équation , on trouve :

$$E_{fde}(s) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^m l_{k33} \frac{V_{Rk \max}}{K_{Ek} + sT_{Ek}} \quad (4.121)$$

$$E_{fde}(s) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^m \frac{l_{k33}}{K_{Ek}} \cdot \frac{K_{Ek} / T_{Ek}}{K_{Ek} / T_{Ek} + s} V_{Rk \max} \quad (4.122)$$

$$E_{fde}(t) = \sum_{k=1}^m \frac{l_{k33}}{K_{Ek}} V_{Rk \max} (1 - e^{-(K_{Ek} / T_{Ek})t}) \quad (4.123)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{dE_{fde}(t)}{dt} = \sum_{k=1}^m l_{k33} \frac{V_{Rk \max}}{T_{Ek}} \quad (4.124)$$

Le second membre de l'équation (4.124) correspond à la valeur limite maximale du système d'excitation équivalent, d'où :

$$\frac{V_{Remax}}{T_{Ee}} = \sum_{k=1}^m l_{k33} \frac{V_{Rk \max}}{T_{Ek}} \quad (4.125)$$

De même, pour la valeur limite minimale :

$$\frac{V_{Re\min}}{T_{Ee}} = \sum_{k=1}^m l_{k33} \frac{V_{Rk\min}}{T_{Ek}} \quad (4.126)$$

Ainsi, les équations (4.125) et (4.126) permettent de calculer les tensions limites du système d'excitation équivalent.

4.5 Regroupement des turbines/régulateurs de vitesse

Il y a essentiellement deux types de turbines, la turbine hydraulique et la turbine à vapeur. En raison de la différence des caractéristiques, le regroupement concernera seulement le même type de turbines. Si deux types de turbines se retrouvent dans le même groupe cohérent alors, les turbines hydrauliques sont regroupées ensemble pour former un générateur équivalent hydraulique. De même, les machines thermiques sont regroupées pour former un générateur équivalent thermique. Les deux générateurs équivalents seront alors connectés à une même barre équivalente [26].

Le modèle simplifié de la turbine/régulateur de vitesse de la Figure 14 est utilisé à titre d'exemple pour illustrer la procédure de regroupement [41].

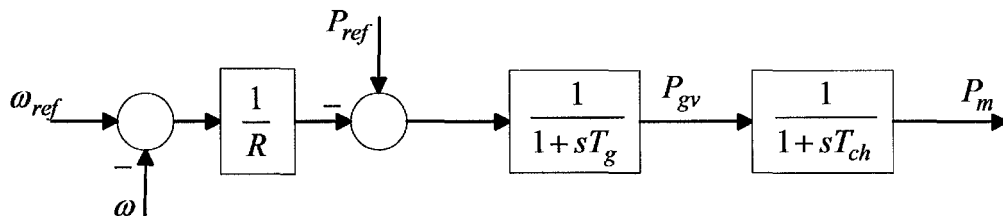


Figure 14 Modèle simplifié de la turbine et le régulateur de vitesse

Ce modèle est décrit par les équations suivantes :

$$\dot{P}_{gvi} = (-P_{gvi} + P_{refi} - (1/R_i)\Delta\omega_i) / T_{gi} \quad (4.127)$$

$$\dot{P}_{mi} = (-P_{mi} + P_{gvi}) / T_{chi} \quad (4.128)$$

P_{gvi} et P_{mi} sont la puissance de la vapeur et la puissance mécanique respectivement. R_i , T_{gi} et T_{chi} sont respectivement, le statisme permanent, la constante de temps du régulateur de vitesse et la constante de temps de l'étage turbine.

L'équation d'état de la turbine et du régulateur de vitesse équivalents a la même structure que celle des équations (4.127) et (4.128). Pour ce système, les coefficients de la matrice de regroupement sont choisis de façon évidente. En effet, la variable d'entrée qui est la vitesse étant identique pour toutes les machines cohérentes et la puissance mécanique de la machine équivalente, exprimée en unité SI, est nécessairement la somme des puissances mécaniques des machines cohérentes. En grandeurs unitaires (pu), on peut écrire alors :

$$P_{me} = \sum_{k=1}^m S_{bk} \cdot P_{mk} / \sum_{k=1}^m S_{bk} \quad (4.129)$$

La matrice de regroupement est obtenue en choisissant ses coefficients diagonaux tous identiques et égaux au coefficient suivant :

$$l_{kii} = S_{bk} / \sum_{i=1}^m S_{bi} \quad (4.130)$$

Les paramètres équivalents de la turbine et du régulateur de vitesse sont alors calculés selon la même procédure utilisée pour le système d'excitation, soient :

$$1/T_{ge} = \sum_{k=1}^m (S_{bk}^2 / T_{gk}) / \sum_{k=1}^m S_{bk}^2 \quad (4.131)$$

$$1/T_{che} = \sum_{k=1}^m (S_{bk}^2 / T_{chk}) / \sum_{k=1}^m S_{bk}^2 \quad (4.132)$$

$$1/(R_e T_{ge}) = \sum_{k=1}^m (S_{bk} / R_k T_{gk}) / \sum_{k=1}^m S_{bk} \quad (4.133)$$

4.6 Regroupement des systèmes stabilisateurs de puissance (PSS)

La figure 15 représente le modèle de stabilisateur de puissance utilisé. La procédure de regroupement des stabilisateurs de puissance est identique à celle développée précédemment pour les systèmes d'excitation.

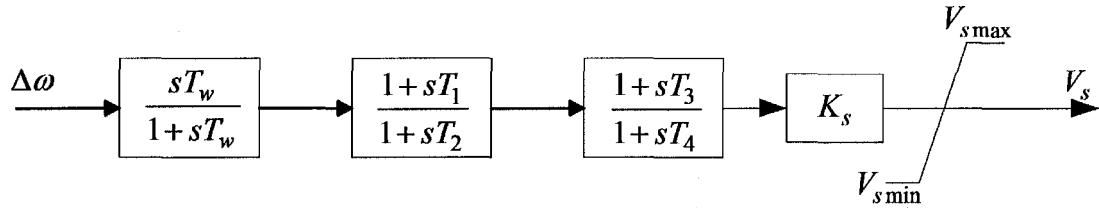


Figure 15 Modèle du stabilisateur de puissance (PSS)

Sa représentation d'état linéaire est donnée par le système d'équation suivant :

$$\dot{V}_{1i} = (-V_{1i} + \Delta\omega_i) / T_{wi} \quad (4.134)$$

$$\dot{V}_{2i} = [-V_{2i} + (1 - T_{1i} / T_{2i})(\Delta\omega_i - V_{1i})] / T_{2i} \quad (4.135)$$

$$\dot{V}_{3i} = [-V_{3i} + (1 - T_{3i} / T_{4i})(T_{1i} / T_{2i})(\Delta\omega_i - V_{1i}) + (1 - T_{3i} / T_{4i})V_{2i}] / T_{4i} \quad (4.136)$$

Et la tension de sortie est :

$$V_{si} = K_{si} \left[(T_{3i} / T_{4i})(T_{1i} / T_{2i})(\Delta\omega_i - V_{1i}) + V_{2i} + V_{3i} \right] \quad (4.137)$$

La forme matricielle pour chaque modèle s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{pssi} &= \mathbf{A}_{pssi} \cdot \mathbf{X}_{pssi} + \mathbf{B}_{pssi} \cdot \Delta\omega_i \\ V_{si} &= \mathbf{C}_{pssi} \cdot \mathbf{X}_{pssi} + D_{pssi} \cdot \Delta\omega_i \end{aligned} \quad (4.138)$$

La représentation d'état correspondant au PSS équivalent doit avoir la même structure que celle de tous les PSS du groupe cohérent (4.138), soit :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{psse} &= \mathbf{A}_{psse} \cdot \mathbf{X}_{psse} + \mathbf{B}_{psse} \cdot \Delta\omega_e \\ V_{se} &= \mathbf{C}_{psse} \cdot \mathbf{X}_{psse} + D_{psse} \cdot \Delta\omega_e \end{aligned} \quad (4.139)$$

Les coefficients relatifs l_{kii} sont choisis de telle sorte que lors du regroupement, la pondération affectée à tous les PSS du groupe cohérent soient identiques, soient :

$$l_{k11} = l_{k22} = l_{k33} = 1/m \quad (4.140)$$

Où m est le nombre de machines dans le groupe cohérent.

Les coefficients du stabilisateur de puissance équivalent sont calculés alors comme suit :

$$1/T_{we} = \sum_{k=1}^m (l_{k11}^2 / T_{wk}) / \sum_{k=1}^m l_{k11}^2 \quad (4.141)$$

$$(1 - T_{1e} / T_{2e}) / T_{2e} = \sum_{k=1}^m l_{k22} (1 - T_{1k} / T_{2k}) / T_{2k} \quad (4.142)$$

D'où :

$$1/T_{2e} = \sum_{k=1}^m l_{k22} / T_{2k} \quad (4.143)$$

Et

$$T_{1e} = T_{2e}^2 \cdot \sum_{k=1}^m l_{k22} \cdot T_{1k} / T_{2k}^2 \quad (4.144)$$

$$(1 - T_{3e} / T_{4e}) (T_{1e} / T_{2e} T_{4e}) = \sum_{k=1}^m l_{k33} (1 - T_{3k} / T_{4k}) (T_{1k} / T_{2k} T_{4k}) \quad (4.145)$$

$$1/T_{4e} = (T_{2e} / T_{1e}) \cdot \sum_{k=1}^m l_{k33} \cdot (T_{1k} / T_{2k} T_{4k}) \quad (4.146)$$

$$T_{3e} = (T_{2e} \cdot T_{4e}^2 / T_{1e}) \cdot \sum_{k=1}^m l_{k33} T_{3k} (T_{3k} \cdot T_{1k} / T_{2k} T_{4k}^2) \quad (4.147)$$

$$K_{se} = \sum_{k=1}^m (l_{k33}^2 \cdot K_{sk}) / \sum_{k=1}^m l_{k33}^2 \quad (4.148)$$

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étape principale de la modélisation des équivalents dynamiques, c'est l'étape de regroupement des unités génératrices. Le

regroupement consiste à calculer les paramètres de la génératrice équivalente comprenant les paramètres équivalents de la machine synchrone, du système d'excitation, de la turbine et du régulateur de vitesse et du stabilisateur de puissance .

La méthode de regroupement proposée constitue la contribution majeure de notre thèse. Elle permet de regrouper les machines et leur systèmes de commande ayant la même structure. En d'autres termes, le modèle de la machine équivalente doit avoir une structure identique à celle de toutes les machines du groupe cohérent. Cette hypothèse est également appliquée pour les systèmes de commande équivalents.

L'application de ce principe nous permet de calculer tous les paramètres équivalents d'une façon analytique dans un processus non itératif, c'est une des caractéristiques importante de la méthode, elle permet un gain considérable en temps de calcul lors des études en ligne. Ces paramètres équivalents sont calculés en tenant compte, à la fois, de la localisation des machines cohérentes dans le réseau original et des conditions initiales du réseau.

Le regroupement des machines et leur système de commande ayant des structures très différentes n'est cependant pas possible avec la méthode que nous proposons. Étant donné que les machines présentant des structures très différentes telles que, par exemple, des générateurs hydrauliques et thermiques ont des modèles mathématiques différents, ce qui ne permet pas d'appliquer notre approche. Ceci constitue une limitation de la méthode, néanmoins, nous considérons que fondamentalement, deux machines très différentes appartiennent rarement à un même groupe cohérent du fait même de la définition de la cohérence.

Nous avons par ailleurs suggéré, dans le cas de la présence des machines hydrauliques et thermiques dans un même groupe cohérent, de déterminer deux machines équivalentes au lieu d'une. Une machine équivalente hydraulique regroupant toutes les machines

hydrauliques dans le groupe et une machine thermique équivalente à l'ensemble des machines thermiques du groupe cohérent. Les deux machines équivalentes sont, ensuite, connectées au même nœud équivalent.

Cette problématique de la présence des modèles ayant des structures différentes dans un même groupe cohérent se pose également pour le regroupement des systèmes de commande, notamment, les systèmes d'excitation. Il y a essentiellement trois types de modèles de systèmes d'excitation qui sont recommandés par l'institut IEEE, les types AC, DC et ST [7]. Dans chaque type une multitude de modèles existe.

Pour le regroupement des systèmes d'excitation n'ayant pas nécessairement la même structure, nous avons suggéré d'utiliser la structure du DCA1 qui est largement utilisée dans l'industrie. Ce modèle est également utilisé pour représenter les autres types de systèmes d'excitation quand les données détaillées ne sont pas disponibles ou dans la situation où les modèles détaillés ne sont pas nécessaires. Dans ce cas ci, un modèle simplifié générique peut être utilisé. Dans ce modèle générique, seules les caractéristiques principales des systèmes d'excitation sont représentées.