

## Exploitation des Techniques fréquentielles avancées dans le contrôle automatique d'excitation des machines synchrones (Etude sous GUI / MATLAB)

Djamel Eddine GHOURAF<sup>1\*</sup>, Abdellatif NACERI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département d'électrotechnique, Université UDL de Sidi Bel Abbes ; Laboratoire IRECOM

**Abstract.** This paper presents a comparative study between two control methods: classical regulator PID and robust controller based on advanced frequency techniques  $H_\infty$ , applied on the automatic excitation control system of synchronous machine (alternators), to improve stability of a SMIB power system. The computer simulation results (with test of robustness against machine parameters uncertainty), have proved that good dynamic performances and more robustness with the robust  $H_\infty$  controller on comparison with using classical PID regulator. Our present study was performed using a GUI realized under MATLAB in our work.

**Keywords:** *synchronous machines powerful, automatic excitation control, classical regulator PID, robust control, advanced frequency techniques  $H_\infty$ , stability and robustness, electric power system*

**Résumé.** Cet article présente une étude comparative entre deux méthodes de commande: Régulateur classique réalisé en PID et un contrôleur robuste basé sur les techniques fréquentielles avancées  $H_\infty$ , appliqués à la régulation automatique d'excitation des machines synchrones puissantes (turboalternateurs) pour l'amélioration de robustesse de stabilité d'un système électro-énergétique (simple standard IEEE type SMIB). Les résultats de simulation (avec un test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la machine), montrent une amélioration considérable des performances dynamiques et une grande robustesse de stabilité avec l'utilisation de contrôleur robuste  $H_\infty$  en comparaison avec un régulateur conventionnel type PID. Notre étude a été effectuée à l'aide d'un GUI qu'on a réalisé sous logiciel MATLAB.

**Mots clés:** *Générateurs synchrones puissants, contrôle automatique d'excitation, AVR-PSS, régulateur PID, système électro-énergétique et stabilité, commande robuste  $H_\infty$ .*

### 1. Introduction

une centrale de production d'électricité contient plusieurs machines synchrones (turbo-alternateurs) qui sont conçues à transformer la puissance mécanique des turbines en puissance électrique (phase de production), cette dernière sera transmise par des lignes de transports, puis distribuées aux éventuels consommateurs (usage domestique ou industriels). Ces consommateurs d'énergie électrique demandent toujours la continuité de service avec une stabilité du système de production, pour leur satisfaire les électrotechniciens cherchent toujours des méthodes et des techniques fiables à fin d'assurer une production d'électricité stable, de bonne qualité, continue, et sans aucune interruption.

\* Corresponding author.

E-mail: [jamelbel22@yahoo.fr](mailto:jamelbel22@yahoo.fr) (GHOURAF, D. E.).

Address: Laboratoire IRECOM, Univ. Sidi Bel Abbes BP 98, SBA, ALGERIE

Le problème de robustesse de stabilité est posé de façon sérieuse pour garantir un bon fonctionnement des Systèmes Electro-Energétiques, et surmonter le problème des oscillations électromécaniques en améliorant l'amortissement du système (la stabilité), pour ces fins des signaux

supplémentaires stabilisateurs sont introduits dans le système d'excitation via son régulateur de tension. Ces signaux stabilisateurs vont produire des couples en phase avec la variation de vitesse du générateur pour compenser le retard de phase introduit par le système d'excitation. Les stabilisateurs de puissance [1] (Power System Stabilizers, PSSs), grâce à leurs avantages en terme de coût économique et d'efficacité, sont les moyens habituels, non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques et assurer la stabilité globale du système .

Ces stabilisateurs conventionnels (réalisés souvent en PI ou PID) ont pour inconvénient principal [2] la mauvaise adaptation à des changements des paramètres du système et lors des variations brusques des conditions de fonctionnement du système à commander (problèmes incertains).

Pour assurer la stabilité du système électro-énergétique en présence des diverses variations nous utilisons les techniques de commande avancées telles que : optimale, adaptative et robuste plutôt que celles classiques. Une des principales caractéristiques actuellement exigées des régulateurs est la robustesse de stabilité, c'est l'aptitude de maintenir la stabilité en présence des variations paramétriques du système (ou aussi non-paramétriques), appelé ainsi incertitudes ou problèmes incertains. L'investigation des algorithmes de commande adaptative (Logique flou, réseau de neurones...) a été largement reportée. Récemment, les algorithmes de commande optimale et robuste: commande LQG, par mode de glissement, commande robuste H2 et H $\infty$  [3-5] ont été appliqués. Tous ces algorithmes supposent la connaissance d'un modèle du système ou des intervalles sur les incertitudes.

## 2. Modélisation du système électro-énergétique 'SMIB':

### 2.1. Description générale du système électro-énergétique

Le système électro-énergétique 'SEE' étudié comporte à plusieurs systèmes électriques avec un modèle mathématique très compliqué [6]. La figure 1 représente un système standard IEEE type SMIB (Single Machine Infinity Bus System) avec la commande d'excitation du Générateur Synchrone Puissant (GSP).

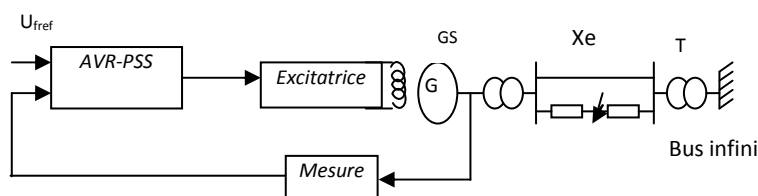


Figure 1. Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant

Les puissances d'excitation des alternateurs de forte puissance sont telles (plusieurs mégawatts) qu'il est intéressant d'utiliser la puissance mécanique disponible sur l'arbre pour fournir le courant d'excitation. On utilise alors un système d'excitation monté sur le même arbre que le rotor de l'alternateur. De plus, il est alors possible de supprimer les contacts glissants nécessaires à l'alimentation de l'excitation [1,2].

L'AVR (Automatic Voltage Regulator) est un système de régulation de la tension d'un générateur synchrone puissant. Le système AVR agit pour réguler cette tension par l'intermédiaire de l'excitatrice. Par ailleurs, Les stabilisateurs des systèmes de puissance PSS, étaient développés pour assister à amortir les oscillations de la tension de sortie d'un alternateur [1,3]. Le schéma synoptique simplifié de système d'excitation avec régulateur AVR, PSS est donné par les figures 2 et 3.

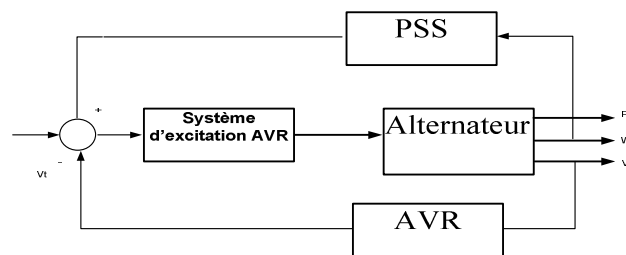


Figure 2. Système d'excitation avec l'AVR-PSS

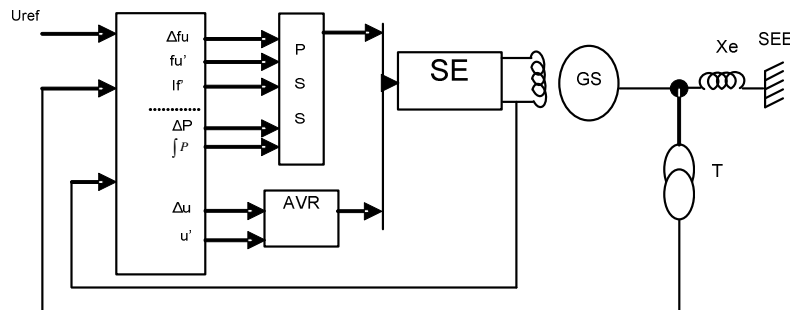


Figure3. Schéma fonctionnel du système de commande avec PSS pour GSP

## 2.2. Structure du système électro-énergétique avec les contrôleurs robustes $H_\infty$

On utilise la structure de base du système de commande d'un générateur synchrone puissant avec le régulateur robuste illustré sur les figures 4 [6] :

Comme objet de commande on a le générateur synchrone avec le régulateur AVR- FA (type PID avec PSS conventionnel), un système d'excitation SE (excitatrice), et un block d'informations et de mesures (BIM) des paramètres de sortie à régulés.

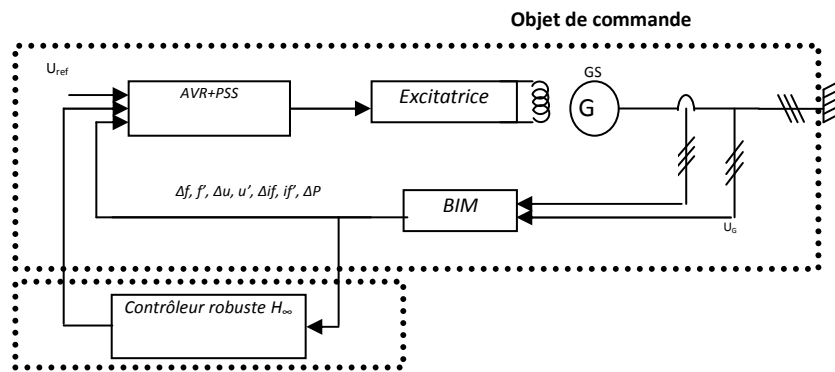


Figure 4. Système de commande d'excitation GS

### 2.3. La modélisation de Park du GSP:

La modélisation de Park construite à partir des équations électriques de la machine (Fig. 5).

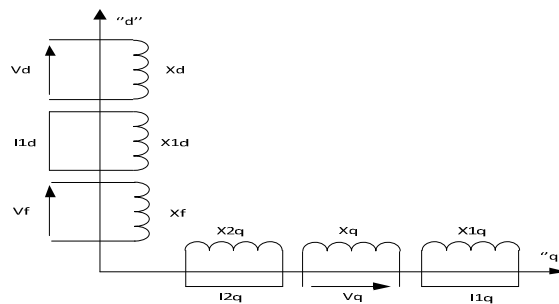


Figure 5. Transformation de PARK de la machine synchrone [7]

Ce modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. L'induction dans l'entrefer est sinusoïdale, la saturation du circuit magnétique, les pertes fer, les harmoniques d'encoches et d'espaces ne sont pas pris en compte dans la modélisation. En raison de la simplicité de la formulation algébrique, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande [1,6].

### 2.4. La modélisation par réseaux de perméances (PARK-GARIOV)

Dans cet article on a basé sur la modélisation par réseaux de perméances (pour éliminer des hypothèses simplificatrices et tester l'algorithme de commande) de la machine, dite modèle PARK-GARIOV [4,6], qui est définie par les équations et la figure 6 suivante :

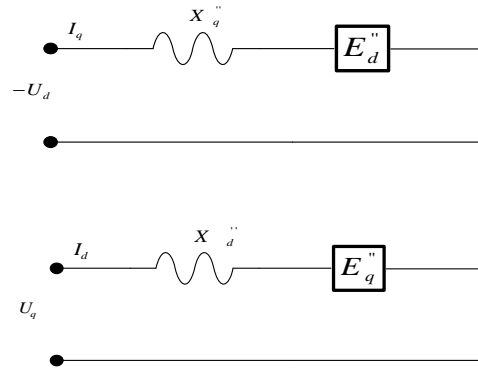


Figure 6. Schémas équivalents simplifiés de la machine synchrone avec circuits amortisseurs (modèle PARK-GARIOV)

• Système d'équations des courants et FEM subtransitoire :

$$I_d = \frac{U_q - E_q''}{X_d''} \quad I_q = \frac{-(U_d - E_d'')}{X_q''} \quad I_f = \frac{(\Phi_f - \Phi_{ad})}{X_{sr}} \quad (1)$$

$$I_{1d} = \frac{(\Phi_{1d} - \Phi_{ad})}{X_{srd}} \quad I_{2q} = \frac{(\Phi_{2q} - \Phi_{aq})}{X_{sr2q}} \quad I_{1q} = \frac{(\Phi_{1q} - \Phi_{aq})}{X_{sr1q}}$$

$$E_q'' = \frac{\frac{1}{X_{sf}} \cdot \frac{X_f}{X_{ad}} E_q' + \frac{1}{X_{sfd}} \cdot \frac{X_{fd}}{X_{ad}} E_{fq}'}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{sf}} + \frac{1}{X_{sfd}}} E_d'' = \frac{\frac{1}{X_{sfq}} \cdot \frac{X_{fq}}{X_{aq}} E_{fd}'}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{sfq}}} \quad (2)$$

• Système d'équations des flux:

$$\Phi_{ad} = E_q'' + (X_d'' - X_s) I_d \quad ; \quad \Phi_{aq} = E_d'' + (X_q'' - X_s) I_q \quad \Phi_f = \omega_s \int_0^{\Phi_f} (-R_f I_f + U_{f0}) dt \quad \Phi_{1d} = \omega_s \int_0^{\Phi_{1d}} (-R_{1d} I_{1d}) dt$$

$$\Phi_{1q} = \omega_s \int_0^{\Phi_{1q}} (-R_{1q} I_{1q}) dt \quad \Phi_{2q} = \omega_s \int_0^{\Phi_{2q}} (-R_{2q} I_{2q}) dt \quad (3)$$

• Equation du mouvement du rotor de la machine (mécanique):

$$d\delta = (\omega - \omega_s) dt \quad , \quad s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \quad (4)$$

$$M_T + M_j + M_e = 0 \quad \text{avec } M_j: \text{moment d'inertie} \quad \left( M_j = -j \frac{d\omega}{dt} \right) \quad (5)$$

$$j \frac{d\omega}{dt} + \frac{P_e}{\omega_s} = M_T \quad T_j \frac{d}{dt} s + (\Phi_{ad} I_q - \Phi_{aq} I_d) = M_T \quad \text{ou } T_j \frac{d}{dt} s = M_T - M_e \quad (6)$$

## 2.5. Modèles des régulateurs AVR et PSS:

Dans notre étude la machine synchrone est équipée par un régulateur de tension modèle « IEEE » type - 5 [1], est représenté par la figure 7.

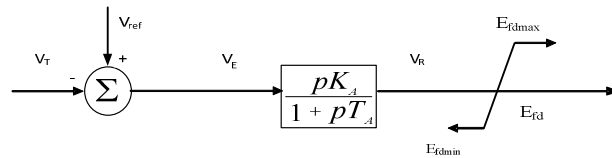


Figure 7. Schéma du circuit d'excitation (AVR) « IEEE » type-5 simplifié

• Le Signale de sortie de l'AVR est donné par :

$$\text{Avec : } V_R = \frac{K_A V_E - V_R}{T_A} \quad \text{et} \quad V_E = V_{ref} - V_T \quad (7)$$

Concernant le stabilisateur PSS des efforts considérables ont été déployés pour le développement de ce système. La fonction de base d'un système stabilisateur de puissance PSS est de moduler l'excitation du générateur synchrone puissant pour fournir un amortissement aux oscillations [1,2,3].

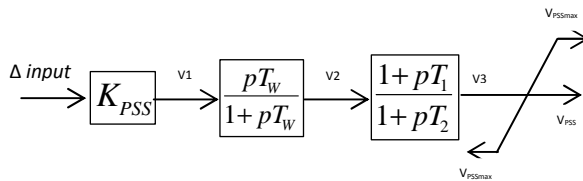


Figure 8. Schéma fonctionnelle du PSS utilisé [8]

• Le Signal du PSS est donné par [8] :

$$\Delta input = \begin{cases} \Delta P, \int p \\ ou \\ \Delta \omega = \omega_{mach} - \omega_0 \\ et \\ \Delta I_f = I_f - I_{f0} \\ et \\ \Delta U_f = U_f - U_{f0} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{V_2 - V_1}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} \dot{V}_2 \quad ; \\ \dot{V}_2 &= \frac{V_3 - V_2}{T_2} + \frac{T_3}{T_2} \dot{V}_3 \quad ; \\ \dot{V}_3 &= \frac{V_3}{T_w} \dot{V}_1 \quad ; \quad \dot{V}_1 = K_{PSS} \cdot \Delta input \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.6. Modèle simplifié du système SMIB étudié :

Considérons le système de la figure 9. Ou la machine synchrone est connectée par une ligne de transmission à un réseau de puissance infini type SMIB. La ligne ayant une résistance  $R_e$ , et une inductance  $L_e$  [6].

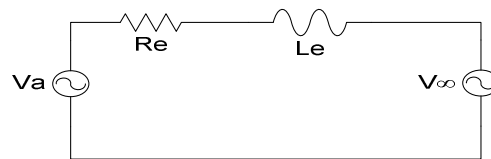


Figure 9. Machine synchrone connectée à un réseau bus infini

On définit l'équation suivante du système SMIB :

$$V_{\infty} = P V_{\infty} = \sqrt{2} V_{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} + L_e I'_{\text{odq}} + X_e \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

## 3. La commande robuste $H_{\infty}$ appliquée aux SEE

### 3.1. Formulation et résolution du problème commande :

La commande robuste  $H_2$  ou  $H_{\infty}$  (commande fréquentielle avancée) est née de la recherche d'une meilleure formalisation du cahier des charges par des critères mathématiques dont la résolution efficace permet de synthétiser un correcteur satisfaisant ce cahier des charges [9, 10].

Le problème commande robuste  $H_{\infty}$  standard est défini de la manière suivante (figure 10) [9] :

Etant donné système augmenté Pa trouve un régulateur stabilisant K tel que :

$$j(K) = \|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma \quad (11)$$

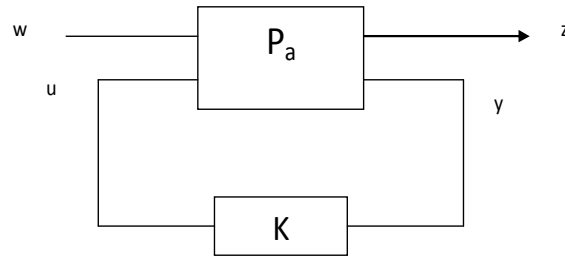


Figure 10. Le problème standard  $H_\infty$

La matrice de transfert  $P(s)$  décrit un système comprenant 2 ensembles d'entrées et 2 ensembles de sorties. Le vecteur  $w$  ce présenté des entrées extérieurs, telles que signaux, de référence, perturbation bruit. Le vecteur  $u$  représente les commandes. Les signaux  $z$  obtenus en appliquant des pondérations. Enfin  $y$  représente les mesures disponibles pour élaborer la commande.

Le schéma de la figure10 peut être décrit comme suit :

$$\begin{cases} z = P_{11} w + P_{12} u \\ y = P_{21} w + P_{22} u \\ u = K \cdot y \end{cases} \quad (12)$$

D'où l'on déduit :

$$z = [P_{11} + P_{12} \cdot K \cdot (I - P_{22} \cdot K)^{-1} P_{21}] w \quad (13)$$

Pour souci de simplicité on va noter :

$$T(P, K) = [P_{11} + P_{12} \cdot K \cdot (I - P_{22} \cdot K)^{-1} P_{21}] \quad (14)$$

Sachant que le système à une réalisation minimale :  $P(s) = [A, B, C, D]$

Ayant deux entrées et deux sorties les matrices A, B, C, D ont les formes suivantes :

$$\begin{aligned} B &= [B_1 \quad B_2] \\ C &= \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

$P(s)$  Vérifie:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (16)$$



Avec l'étude de l'approche de la sensibilité mixte on peut construire le système global suivant (Figure 11):

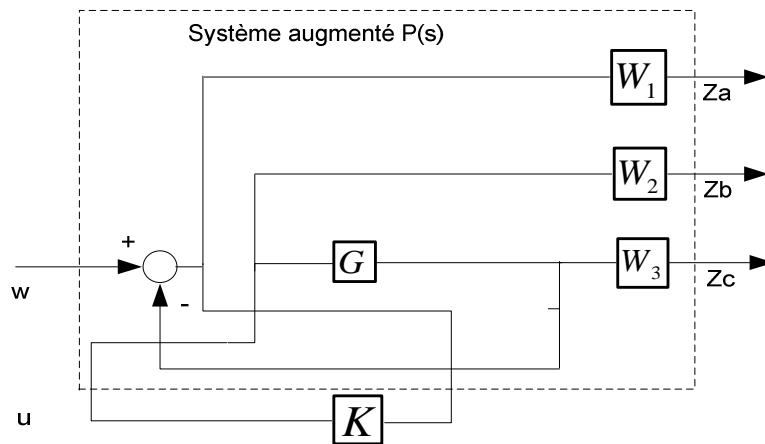


Figure 11. Représentation du système augmenté

$W_1, W_2, W_3$  les fonctions des pondérations

Le système augmenté devient alors:

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1.G \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3.G \\ 1 & -G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Si  $G(s), W_1(s), W_2(s), W_3(s)$  ont les réalisations suivantes:

$$G(s) = [A_G, B_G, C_G, D_G] \quad (18)$$

$$W_1(s) = [A_{W_1}, B_{W_1}, C_{W_1}, D_{W_1}] \quad (19)$$

$$W_2(s) = [A_{W_2}, B_{W_2}, C_{W_2}, D_{W_2}] \quad (20)$$

$$W_3(s) = [A_{W_3}, B_{W_3}, C_{W_3}, D_{W_3}] \quad (21)$$

Alors la réalisation de  $P(s)$  est comme suit :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Et encore :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A_G & 0 & 0 & 0 & 0 & B_G \\ -BW_1 C_G & AW_1 & 0 & 0 & BW_1 & -BW_1 D_G \\ 0 & 0 & AW_2 & 0 & 0 & BW_2 \\ BW_3 C_G & 0 & 0 & AW_3 & 0 & BW_3 D_G \\ -DW_3 C_G & CW_1 & 0 & 0 & DW_3 & DW_3 D_G \\ 0 & 0 & CW_2 & 0 & 0 & DW_2 \\ DW_3 C_G & 0 & 0 & CW_3 & 0 & DW_3 D_G \\ C & 0 & 0 & 0 & 1 & D_G \end{bmatrix} \quad (23)$$

### 3.2. Synthèse du correcteur robuste $H_\infty$ :

Le problème d'existence et de synthèse des régulateurs d'excitations robustes  $H_\infty$  formulées comme suite

On considère la réalisation de l'objet linéaire de commande et d'observation dans le domaine d'espace d'état, et qu'on peut écrire sous la forme (qui correspond à la figure (12)):

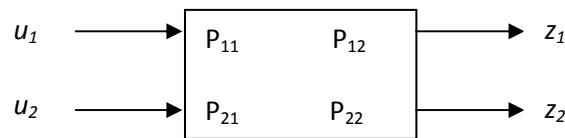


Figure 12. L'objet de commande

Le problème standard de la commande  $H_\infty$  (problème de petit gain) est effectuée par la vérification de l'inégalité de norme infinie suivante :

$$\|T_{z1u1}\|_\infty = \sup(\sigma_{\max}(T_{z1u1}(j\omega))) \leq \gamma \quad (24)$$

$\sigma_{\max}$  La valeur singulière maximale.

$\gamma =$  constante  $> 0$  : niveau d'optimisation.

Avec :

$$\|T_{z1u1}\| = \begin{bmatrix} W_1^{-1} S \\ W_2^{-1} R \\ W_3^{-1} T \end{bmatrix} \quad (25)$$

Où :

$$\frac{1}{\sigma(s(j\omega))} \geq |W_1(j\omega)| \text{ et } \sigma(T(j\omega)) \leq |W_3(j\omega)| \quad (26)$$

S : Sensibilité

T : Sensibilité complémentaire

$W_{1,2,3}$ : les fonctions des pondérations

$\sigma$  : La valeur singulière maximale.

La synthèse globale du régulateur se réalise par la résolution des deux matrices de HAMILTHON  $H$  et  $J$  suivantes (qui correspondent aux deux équations algébriques de RICCATI) [3,10]:

$$H_{\infty} = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ C_1 C_1^T & -A \end{bmatrix} \quad J_{\infty} = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 C_1 C_1^T - C_2 C_2^T \\ B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix} \quad (27)$$

L'existence du régulateur robuste pour que si les conditions suivantes seront vérifiées:

- H et J n'admettent pas des racines sur l'axe imaginaire.
- X, Y (2 solutions d'équations de RICCATI), non négatives
- $\varphi(XY) < \gamma^2$      $\varphi$  : rayon spectral des solutions)

Si tout ces conditions sont vérifiées, le régulateur robuste a pour forme :

$$K(S) = -F_{\infty} [(SI - A_{\infty})^{-1}] Z_{\infty} L_{\infty} \quad (27)$$

Ou :

$$A_{\infty} = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_{\infty} + B_2 F_{\infty} + Z_{\infty} L_{\infty} C_2 \quad (28)$$

$$F_{\infty} = -B_2^T X_{\infty}; \quad (29)$$

$$L_{\infty} = -Y_{\infty} C_2^T; \quad Z_{\infty} = (I_n - \gamma^2 Y_{\infty} X_{\infty})^{-1} \quad (30)$$

### 3.3. L'algorithme de synthèse du contrôleur robuste d'excitation PSS- $H_{\infty}$ (sous TOOLBOX-MATLAB)

La résolution du problème de commande (standard et/ou optimale) défini par les relations (24) et (27) est proposée comme suit [10, 11]:

1. Calcule du régime permanent établi (RP) ;
2. Linéarisation du système (obtention des matrices  $[A_0, B_0, C_0, D_0]$ ) ;
3. Le problème principal dans la commande  $H_{\infty}$  et la définition de l'objet de commande augmenté  $P(s)$  dans l'espace d'état :
  - 3-1. Choix des fonctions de pondérations :  $W_1, W_2, W_3$  (selon la procédure proposée)
  - 3-2. L'obtention de l'objet de commande augmenté à partir de sa structure initial  $[A_0, B_0, C_0, D_0]$  et des fonctions de pondérations  $W_{1,2,3}$  correspondant à la réalisation d'un objet MIMO (deux entrées / deux sorties). Dans le langage 'robust control toolbox' on utilise la fonction:  $[A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{12}, D_{21}, D_{22}] = \text{augtf} [A_0, B_0, C_0, D_0, W_1, W_2, W_3]$

4. Vérifier si toutes les conditions aux rangs des matrices sont satisfaisantes, si non on change dans la structure des fonctions des pondérations ;
5. Choix d'une grande valeur de  $\gamma$  (niveau d'optimisation) ;
6. Résolution des deux équations de RICCATI définies par les deux matrices de HAMILTHON H et J ;
7. Si toutes les conditions sont vérifiées on fait diminuer la valeur de  $\gamma$ , si non on fait augmenter  $\gamma$ , et on refait les étapes 4 à 5 jusqu'à l'obtention d'une solution optimale satisfaisante (une valeur optimale  $\gamma_{\min}$ ) ;
8. Réduction de l'ordre du régulateur si nécessaire (dans le langage RCT on utilise la commande 'Schbal' par exemple) ;
9. Par l'obtention des valeurs optimales et deux solutions d'équations de RICCATI on obtient la structure du régulateur  $H_{\infty}$  ainsi que les racines de la boucle fermée avec le régulateur robuste ;
10. Les paramètres du contrôleur robuste  $H_{\infty}$  sous forme linéaire LTI (SS espace d'état, TF fonction de transfert ou ZPK zéros - pôles - gains), seront transférés de l'espace de travail (work space) vers le milieu Simulink (block LTI-system);
11. La mise en marche du sous-système 'simulation' et la réalisation de l'étude de la stabilité et la robustesse du système électro-énergétique sous différentes conditions de fonctionnements.

L'algorithme de synthèse du contrôleur d'excitation robuste  $H_{\infty}$  proposé dans ce travail est clairement schématisé par l'organigramme de la figure 13

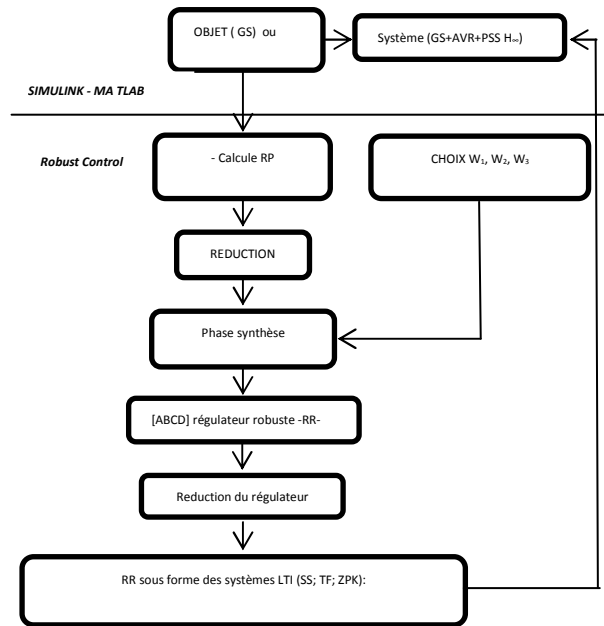


Figure 13. Algorithme de synthèse du régulateur robuste d'excitation Pour une seule machine (sous MATLAB/SIMULINK)

## 4. Etude analytique du comportement dynamique de SMIB avec le contrôleur robuste $H_\infty$

### 4.1. Simulation du système SMIB sous MATLAB/SIMULINK :

La simulation du système électro-énergétique étudié avec le contrôleur robuste PSS- $H_\infty$  sous logiciel Matlab/Simulink est représentée sur la figure 14 [7]

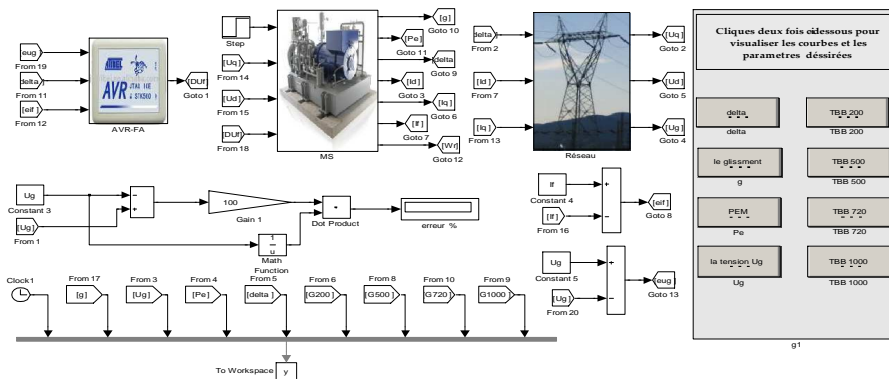


Figure 14. Structure de la machine synchrone avec le contrôleur robuste  $H_\infty$

## 4.2. Réalisation d'un GUI pour l'étude sous MATLAB

Pour analyser et visualiser les différents comportements dynamiques du système électro énergétique on a créé et élaboré un GUI (Graphical User Interfaces) sous logiciel MATLAB. Cette technique avec le Gui MATLAB réalisé nous ont permet:

- D'Effectuer le contrôle du système à partir des régulateurs (PSS, PSS-Hinf)
- De visualiser les résultats de la régulation et la simulation de notre système
- De calculer les paramètres dynamiques du système.
- De tester la stabilité et la robustesse du système.
- D'étudier les différents régimes de fonctionnement du générateur synchrone puissant (sous excité, nominale, sur excité).

Les différentes opérations sont effectuées à partir du GUI réalisé (représenté à la figure 15)

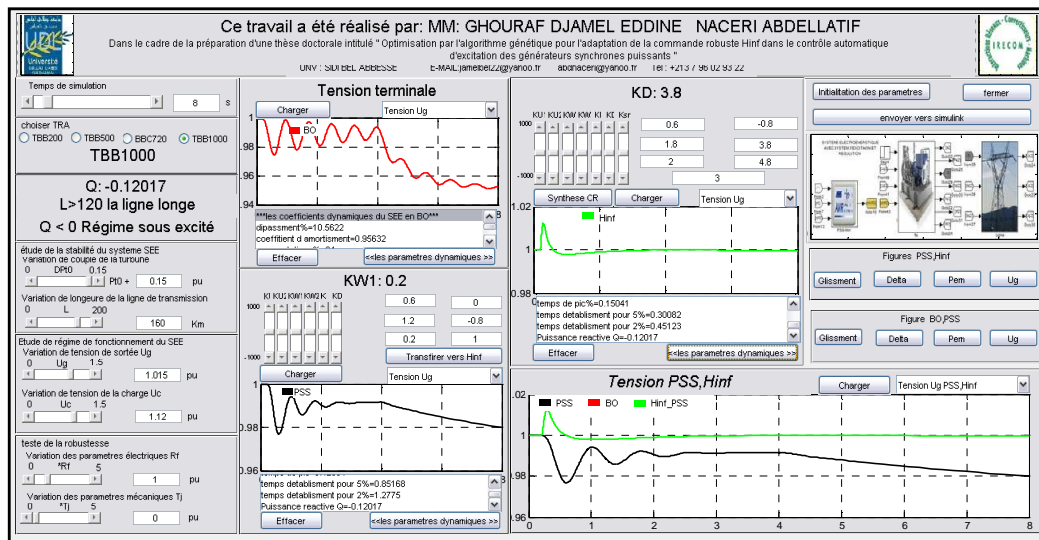


Figure 15. L'application du système sous GUI/MATLAB

## 4.3. Résultats de simulation et discussion

L'étude du système s'est faite pour les trois cas suivants:

- 1- Système en Boucle Ouverte (sans régulation) ;
  - 2- Système en Boucle Fermée avec le régulateur conventionnel PSS (AVR-FA);
  - 3- Système en Boucle Fermée avec le contrôleur robuste  $H_{\infty}$ -PSS
- On a effectué des perturbations par variation brusque du couple de la turbine a 15% de  $\Delta T_m$  à l'instant  $t=0.2s$ , avec variations des paramètres du réseau extérieur (variation de  $X_L$ ):
    - pour une ligne longue avec  $L > 120$  km ( $X_L = 0.5$  pu);
    - pour une ligne moyenne de longueur 80 km  $< L < 120$  km ( $X_L = 0.4$  pu et  $X_L = 0.3$  pu);
    - pour une ligne courte de longueur  $L < 80$  km ( $X_L = 0.2$  pu et  $X_L = 0.1$  pu).

- On a simulé les régimes de fonctionnements suivants (avec différentes configurations du réseau extérieur cités en haut):
  - Régime nominale
  - Renvoi de la puissance réactive du réseau vers la machine ( $Q < 0$ ) en régime sous excité pendant les heures de repos (la nuit par exemple) ;
  - la sur - production de l'énergie réactive ( $Q$  très grande  $\gg$ ) en régime sur - excité pendant les heures de pointes.
- Notre étude à été effectuée pour différents types des GSP: TBB-200, TBB-500, BBC-720 et TBB-1000, dont les paramètres de ces machines sont donnés en annexes A.

On présente sur le tableau 1 un exemple des résultats analytiques du comportement dynamique de SMIB par les calcules des paramètres suivants :

$\alpha$  : coefficient d'amortissements

$\varepsilon$  %: erreur statique en %

$d$  %: dépassement en %

$t_s$  : temps de réponse pour 5%

Les résultats obtenus par GUI Matlab réalisé, avec GSP TBB1000

Tableau 1. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB

coefficients d'amortissement $\alpha$				Erreur statique %		
Q	BO	PSS	PSS-H $\infty$	BO	PSS	PSS-H $\infty$
-0.160	instable	-1.761	-2.673	instable	1.620	négligeable
-0.222	instable	-1.731	-2.593	instable	1.629	négligeable
0.2139	-0.2442	-1.855	-2.766	5.038	1.487	négligeable
0.1634	-0.2354	-1.759	-2.695	5.202	1.235	négligeable
0.5746	-0.2095	-1.470	-2.116	3.777	0.687	négligeable
0.5663	-0.2080	-1.442	-2.099	3.597	0.656	négligeable
Temps de réponse pour 5%				Dépassement %		
Q	BO	PSS	PSS-H $\infty$	BO	PSS	PSS-H $\infty$
-0.160	instable	1,704	rapide	9.572	7,892	3.682
-0.222	instable	1,713	rapide	9.487	7,847	3.482
0.2139	-	1,617	rapide	10,959	8,314	3.915
0.1634	-	1,706	rapide	10,564	7,883	3.737
0.5746	14,320	2,041	rapide	9,402	6,588	2.290
0.5663	14,423	2,080	rapide	9,335	6,463	2.247

De l'analyse des résultats trouvés dans les tableaux impairs on peut constater ce qui suit:

Le régime le plus critique qui influe sur le système est le régime sous excité (cas plus défavorable) pour les différentes configurations.

Concernant les régulateurs PSS et PSS- $H_\infty$  nous remarquons que le système est plus stable dans tous les régimes et avec tous types des lignes de transmission, on a des améliorations considérables des performances dynamiques (augmentation de la précision) du système avec régulation en comparaison avec celui en boucle ouverte.

On remarque ainsi que le contrôleur robuste PSS- $H_\infty$  apportent beaucoup plus d'améliorations de ces performances, par rapport l'utilisation du régulateur PSS seul. D'après ces tableaux on a vérifié les conditions de stabilité et d'amélioration des performances dynamiques du système commandé avec les contrôleurs robuste PSS- $H_\infty$ .

#### 4.3.1 Etude de stabilité

Pour étudier le comportement dynamique de notre système en régime perturbé (amortissement d'oscillations électromécaniques des paramètres de la machine synchrone), Les différents modèles (avec et sans réglage d'excitation) ont été réalisés sous MATLAB/SIMULINK.

Les courbes obtenues (16 et 17) nous donnent respectivement : la variation de vitesse en terme de glissement ( $\Delta\omega$ ) ; L'angle interne 'delta' du GSP entre la tension et la FEM ; La puissance électromagnétique ( $P_e$ ); La tension terminal du GSP ( $U_g$ ).

**Simulation du Turbo-alternateur TBB-1000 avec:  $P_g=0.85(pu), X_e=0.5(pu), Q_1=-0.2716(pu)$**

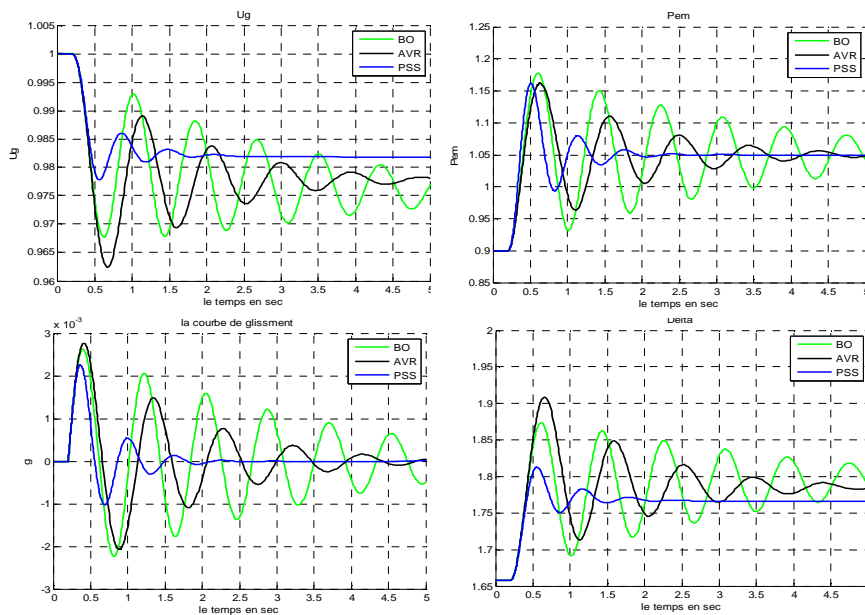


Figure 16. Fonctionnement en régime sous excité du TBB1000 raccordé à une ligne longue en Boucle Ouverte et en BF avec AVR et PSS



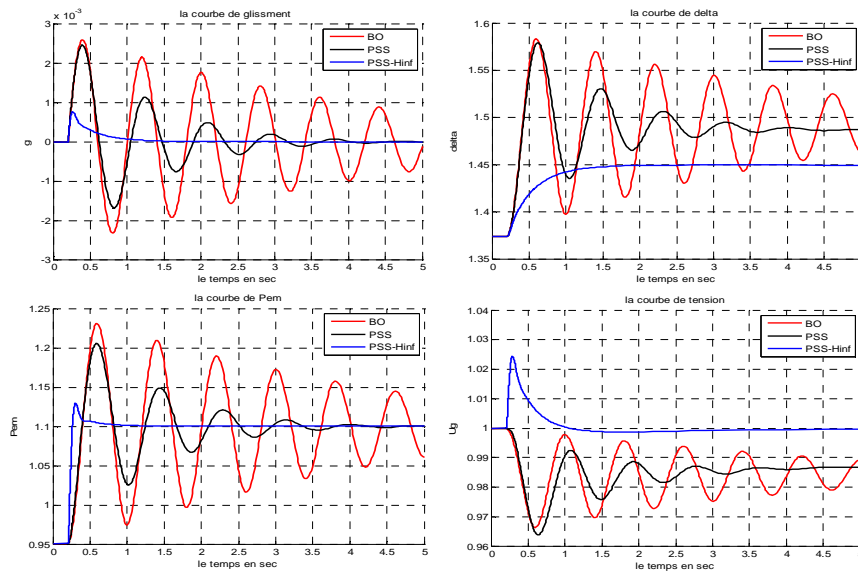


Figure 17. Fonctionnement en régime sous excité du TBB1000 raccordé à une ligne longue en Boucle Ouverte et en BF avec PSS et PSS- $H\infty$

Des résultats obtenus on peut constater que:

Avec l'utilisation du contrôleur d'excitation (l'AVR-FA), Le système est nettement plus stable et plus performant par rapport au système sans régulation, on admet des coefficients d'amortissements élevés, les temps de réponse sont court (rapidité du système), des erreurs statiques faibles (précision). Généralement on a obtenue de très bonnes qualités des régimes transitoires avec l'amortissement des oscillations électromécanique meilleurs avec ce contrôleur d'excitation.

La stabilité transitoire du système est très performante et surtout avec le contrôleur PSS- $H\infty$ , on obtient des améliorations considérables dans la qualité des régimes transitoires de tous les paramètres du système, même pour notre régime critique qui est le régime de repos de la station (sous-excité). Après des petites oscillations le système retrouve son état initial avec des erreurs statiques négligeables (précision meulier) et des temps d'établissements très court (système très rapide).

#### 4.3.2 Test de Robustesse

Dans un premier temps on effectué des variations paramétriques électriques (majoration de 100% de R). Puis, on effectue des variations paramétriques mécaniques (minoration de 50% de l'inertie J) en supposant cette fois ci que les paramètres électriques sont connus (constants).

- Le temps de la simulation est évalué cette fois ci à 8 secondes.
- Nous présentons dans la figure 18 (Pour les incertitudes électriques) et la figure 19 (Pour les incertitudes mécaniques), la réponse des grandeurs électriques et mécaniques de la machine synchrone, vis-à-vis ces variations paramétriques (électriques et mécaniques) à l'instant  $t = 4$  s, pour les différents types des GSP utilisés et sous plusieurs modes et conditions de fonctionnements du SEE (Régimes / configurations).

**a-Effets de variation des paramètres électriques (majoration 100% de R à t=4s)**

**1- Simulation du GSP TBB-1000 avec:  $P_g=0.85(pu), X_e=0.5(pu), Q_1=-0.4332(pu)$**

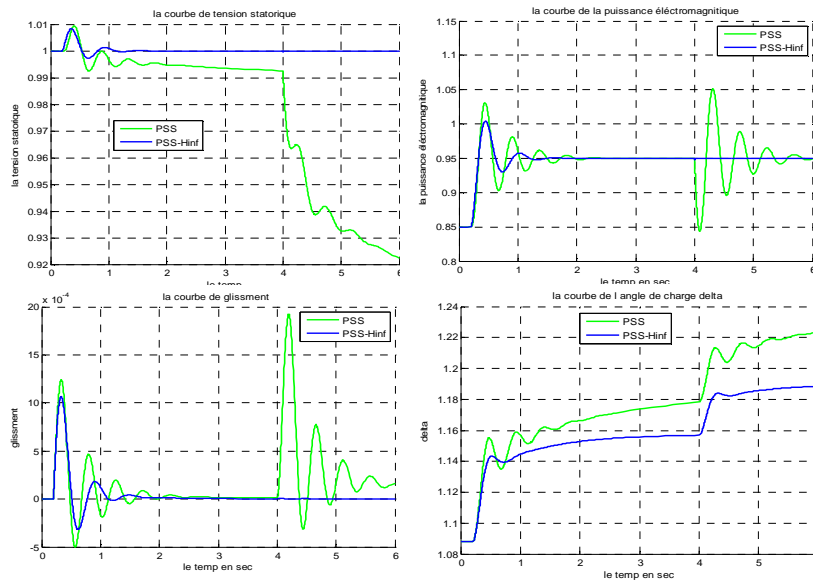


Figure 18. Fonctionnement en régime sous excité du TBB1000 raccordé à une ligne longue en BF avec PSS et PSS-  $H\infty$

**b-Effets de variation des paramètres mécaniques (minoration 50% de J à t=4s)**

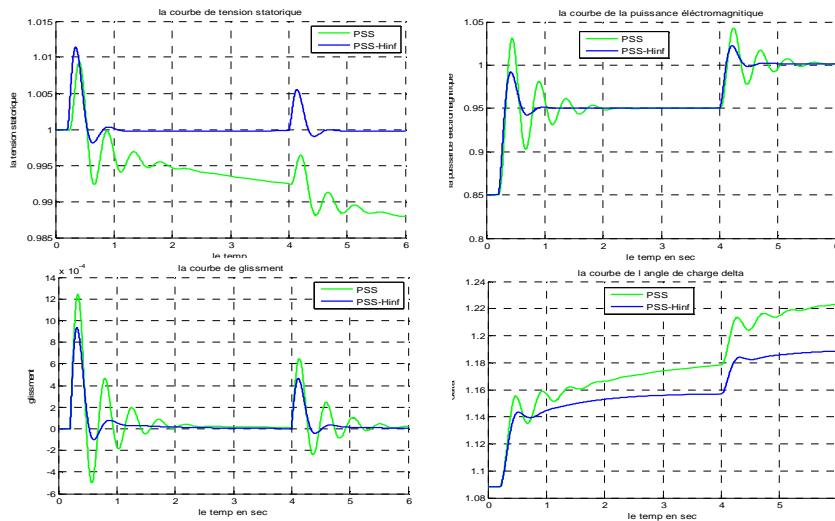


Figure 19. Fonctionnement en régime sous excité du TBB1000 raccordé à une ligne longue en BF avec PSS et PSS-  $H\infty$

- D'après les résultats obtenus on peut constater qu'une très grande robustesse de stabilité de notre système, vis-à-vis ces variations paramétriques (électrique et mécaniques) se manifeste avec l'utilisation du contrôleur d'excitation PSS-H $\infty$ .

- Dans certaines situations critiques (régime de fonctionnement sous-excité), ce contrôleur est plus robuste, il améliore considérablement son efficacité pendant ces périodes de fonctionnement très difficiles de la station électrique, pour supporter par exemple des coupures de courants et assure la continuité de service du SEE universel.

## 5. Conclusion :

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'étude des systèmes de régulation et de contrôle robuste d'excitation des générateurs synchrones puissants, pour l'amélioration des performances et de la robustesse de stabilité d'un système électro – énergétique. La synthèse de ces contrôleurs robustes, est basée sur les techniques d'optimisation H $\infty$  utilisant les méthodes fréquentielles avancées de la commande automatique moderne. Ces contrôleurs d'excitation sont capables de maintenir des meilleures performances dynamiques et de garantir la robustesse de stabilité du système étudié face à des perturbations  $y$  compris incertains (incertitudes sur le système), sous différents régimes de fonctionnements et configurations des réseaux.

## 6. Références:

- [1] P. KUNDUR, "Definition and Classification of power System Stability", Draft 2, 14 January, 2002
- [2] P.M. ANDERSON, A. A. FOUAD "Power System control and Stability", IEE Press, 1991.
- [3] N. A. LEHTOMAKI, N. R. SANDELL, and M.ATHANS, \ Robustness results in linear quadratic Gaussian based multi variable control design," IEEE Trans. On Automatic Control
- [4] K. GLOVER, J.C. DOYLE, P.P. KHARGONEKAR, B.A. Francis "State-space solutions to standard H $_2$  and H $\infty$  control problems", IEEE Trans. on A.C., 1989, vol.34, N° 8, 834-847.
- [5] Zhou K., Doyle J.C., Glover K. "Robust and optimal control. Englewood Cliffs", NJ: Prentice Hall, 1996
- [6] S. V. SMOLOVIK "Méthodes de modélisation mathématique des processus transitoires des générateurs synchrones plus usuels et non traditionnels dans les systèmes électro -énergétiques"Thèse doctorat d'état, Institut polytechnique de Leningrad, 1988 (traduit du Russe).
- [7] GHOURAF.D.E "Exploitation des techniques fréquentielles avancées dans le contrôle automatique d'excitation des machines synchrones" mémoire Magister ETT, op. convertisseur électromécanique, Dept. ETT, université SBA, 2009-20110
- [8] LA. GROUZDEV, A.A. STARODEBSEV, S.M. OUSTINOV "Conditions d'application des meilleurs amortissements des processus transitoires dans les systèmes énergétiques avec optimisation numérique des paramètres du régulateur AVR-FA" Energie -1990-N°II-pp.21-25 (traduit du russe).
- [9] R. Asgharian "Asymptomatic approach to performance weights selection in design of robust H $\infty$ PSS using genetic algorithms", IEEE trans. on EC, vol 11, No 21, September 1996, pp.111-117
- [10] : Introduction `a la commande multi variable des systèmes : méthodes de synthèse fréquentielle Hinf .Cours de 3A Instru Auto de l'ENSI de Caen G. Scorletti Maitre de conférences `al' Université de Caen LAP, ISMRA
- [11] G. DUC, Robustesse des Systèmes Linéaires Multi variables, Ecole Supérieure d'Electricité, 1994.

## 7. Annexes

### Paramètres des générateurs synchrones puissants étudiés

Paramètres	TBB200	TBB500	BBC720	TBB1000	Unités de mesures	Notations
Puissance nominale	200	500	720	1000	MW	Puissance nominale
Facteur de puissance	0.85	0.85	0.85	0.9	p.u.	Facteur de puissance nom.
$X_d$	2.56	1.869	2.67	2.35	p.u.	Réactance synchrone longitudinale
$X_q$	2.56	1.5	2.535	2.24	p.u.	Réactance synchrone transversale
$X_s$	0.222	0.194	0.22	0.32	p.u.	Réactance inductive shunt statorique
$X_f$	2.458	1.79	2.587	2.173	p.u.	Réactance inductive du circuit d'excitation
$X_{sf}$	0.12	0.115	0.137	0.143	p.u.	Réactance inductive shunt du circuit d'excitation
$X_{sfd}$	0.0996	0.063	0.1114	0.148	p.u.	Réactance inductive shunt du circuit d'amortissement sur l'axe directe
$X_{sf1q}$	0.131	0.0407	0.944	0.263	p.u.	Réactance inductive shunt du premier amortisseur sur l'axe en quadrature q
$X_{sf2q}$	0.9415	0.0407	0.104	0.104	p.u.	Réactance inductive shunt du seconde amortisseur sur l'axe en quadrature q
$R_a$	0.0055	0.0055	0.0055	0.005	p.u.	Résistance active statorique
$R_f$	0.000844	0.000844	0.00176	0.00132	p.u.	Résistance du circuit d'excitation (rotor)
$R_{1d}$	0.0481	0.0481	0.003688	0.002	p.u.	Résistance active du circuit d'amortissement selon l'axe direct
$R_{1q}$	0.061	0.061	0.00277	0.023	p.u.	Résistance active du premier circuit d'amortissement selon l'axe en Quadrature
$R_{2q}$	0.115	0.115	0.00277	0.023	p.u.	Résistance active du seconde circuit d'amortissement selon l'axe en Quadrature