

Etude des stratégies de commande robuste H_2/H_∞ -Application aux Stabilisateurs de puissance d'un système électroenergetique

Kabi Wahiba^{1*}, Naceri Abdellatif¹, Horch Abdessamad¹

¹ Djilali El Yabes University, Electrical engineering Department, Sidi Bel Abbas -ALGERIA

Résumé. Dans cet article, notre attention s'est focalisée sur les Régulateurs Automatiques de la Tension d'excitation (AVR - Automatic Voltage Regulator) et les Systèmes Stabilisateurs des Puissances (PSS – Power System Stabilizer) robustes de type H_2 et H_∞ appliqués au système électro-énergétique dit « SMIB ». Sachant que l'objectif principal de l'AVR est le maintien d'une tension stable aux bornes de la machine synchrone selon la référence et que le PSS amortit suffisamment les oscillations électromécaniques rotoriques qui est dues aux diverse perturbations, nous avons modélisé mathématiquement le « SMIB » avec l'approche des "Réseaux de Perméances", puis synthétiser deux PSS robustes, le premier est de type PSS- H_2 obtenu par la commande « LQG avec filtre de Kalman sous la norme H_2 », tandis que le deuxième est de type : PSS- H_∞ obtenu par la commande H_∞ et l'approche « Loop-Shaping ». Les résultats de simulations sous Matlab-Simulink ont prouvé que le PSS- H_∞ est plus robuste en performance que le PSS- H_2 .

Mots clés: AVR-PSS, PID, H_2/H_∞

1. Introduction (Problématique et solution)

Les Systèmes Electro-Energétiques (SEE) sont soumis à plusieurs contraintes économiques, écologiques et techniques, ce qui a amené les fournisseurs d'énergie électrique à les faire fonctionner à pleine capacité pour avoir un équilibre entre l'augmentation de la consommation et la production, et ce proche des limites de stabilité [1]. Or, dans ces limites d'opération sévères, l'occurrence de n'importe quelle contingences ou perturbations telles que les court-circuits, les variations brusques de la charge, les pertes dans les lignes et les pertes d'ouvrage (lignes, générateurs, transformateurs, etc.) peuvent mener à une situation critique commençant par des oscillations électromécaniques souvent mal-amorties suivie de l'instabilité flagrante du système. En outre, ces oscillations de faibles fréquences sont associées à l'angle de rotor des génératrices synchrones fonctionnant dans un système les reliant ensemble par des lignes de transmission longues avec d'autres groupes des machines.

* Corresponding author.

E-mail: k_b2222@live.fr (Kabi W.).

Address: Djilali El Yabes University, Electrical engineering Department, Sidi Bel Abbas -ALGERIA

Celles-ci limitent la capacité de transfert des puissances et continuent à se développer entraînant non seulement la perte du synchronisme mais aussi la séparation du système si aucune réponse adéquate n'est rapidement prise [2].

Pour surmonter le problème des oscillations électromécaniques et améliorer l'amortissement du système, des signaux supplémentaires sont ajoutés au le système d'excitation via le régulateur automatique de tension noté AVR (de l'anglais Automatic Voltage Regulator)[3]. Ce dernier a été inventé lors des années cinquante, néanmoins, son inconvénient majeur était le phénomène d'auto-oscillations qu'il engendre quand le gain est très élevé [3]. L'ajout d'un Système Stabilisateur de Puissance noté PSS (de l'anglais Power System Stabilizer) a suscité une attention particulière de la communauté scientifique ; c'est le moyen le plus efficace et le plus couramment utilisé pour amortir suffisamment les oscillations électromécaniques et assurer la stabilité du SEE[4].

Le PSS dit Conventionnel (CPSS) est le premier stabilisateur utilisé, principalement basé sur l'utilisation des compensateurs avance et retard à paramètres fixes pour un modèle linéarisé du SEE autour d'un point de fonctionnement spécifique. D'autres stabilisateurs ont été synthétisés depuis en utilisant la commande par placement des pôles du modèle linéaire du système [5], et optimale [6]. Cependant les SEE sont fortement non-linéaires avec des configurations et des paramètres changeants avec le temps qui engendrent des déplacements du point de fonctionnement sans qu'on oublie les hypothèses simplificatrices du modèle mathématique, d'où l'idée d'utiliser les techniques de la commande robuste.

L'objectif de cet article est de synthétiser deux PSS robustes, le premier par la commande H2 et le deuxième par l'approche H_∞ , ces contrôleurs doivent garder la stabilité et les performances dynamiques du SEE auquel ils sont appliqués malgré les perturbations et les aléas qui peuvent l'affecter.

2. Système électroénergétique étudié

Pour la modélisation mathématique suivie par la simulation numérique, nous avons choisi le standard IEEE –SMIB (de l'anglais Simple Machine Infinite Bus) qui signifie une machine simple reliée à un réseau de puissance infini ou (appelé aussi reliée à jeu de barres infini). Il est composé de deux contrôleurs de la tension d'excitation AVR+PSS insérés sur une excitatrice classique, une Génératrice Synchronique (GS), et une ligne du réseau de transport limitée entre deux transformateurs de puissance de court-circuit très élevée. La figure suivante présente la configuration de base du système « SMIB ».

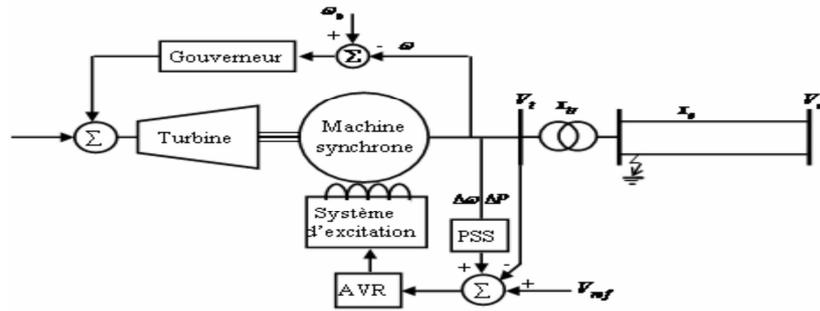


Fig. 1 – La configuration simplifiée du système SMIB

2.1. Choix du modèle mathématique adéquat pour le système « SMIB »

La machine synchrone est transformée du domaine triphasé (a, b, c) au domaine biphasé (d, q), ce passage revient à la difficulté de travailler directement par les équations triphasées du fait que les inductances dépendent de l'angle de rotation « Θ » [7].

N.B. La machine synchrone utilisée dans cet article est de type TBB 1000 qui débite 1000 MW [7].

La littérature nous discerne trois approches de modélisation des systèmes électro énergétiques (analogiques, analogiques-numériques et numériques), pour cette étude nous avons opté pour le modèle « Analogique-Numérique Park-Garivov » basé sur l'approche des réseaux des Perméances, pourquoi ?

- Parce qu'il présente un bon compromis entre la précision des résultats et le cout de calcul ;
- L'approche « des réseaux des Perméances » permet de modéliser le circuit magnétique de la machine synchrone par un schéma électrique équivalent, et il consiste à utiliser les coordonnées relatives de type mutuelle (système « X_{ad} ») où $X=L$; de plus, il nous permet d'utiliser les F.e.m en régimes sub-transitoire (E_d'' et E_q'') pour calculer les variables en régimes perturbés.[8]

2.2. Equations mathématiques du « SMIB »

a. Equations des courants

$$\begin{aligned}
 I_q &= (U_q - E_q'') / X_d'' & I_{1q} &= (\Phi_{1q} - \Phi_{aq}) / X_{sr1q} \\
 I_d &= -(U_d - E_d'') / X_q'' & I_{2q} &= (\Phi_{2q} - \Phi_{aq}) / X_{sr2q} \\
 I_{1d} &= (\Phi_{1d} - \Phi_{ad}) / X_{srd} & I_f &= (\Phi_f - \Phi_{ad}) / X_{sr}
 \end{aligned}$$

b. Equations des flux

$$\Phi_{ad} = E_q'' + (X_d'' - X_s) I_d \quad \Phi_{1q} = \omega_s \int_0^{\Phi_{1q}} (-R_{1q} I_{1q}) dt \quad \Phi_{aq} = E_d'' + (X_q'' - X_s) I_q$$

$$\Phi_{2q} = \omega_s \int_0^{\Phi_{2q}} (-R_{2q} I_{2q}) dt \quad \Phi_f = \omega_s \int_0^{\Phi_f} (-R_f I_f + U_{f0}) dt \quad \Phi_{ld} = \omega_s \int_0^{\Phi_{ld}} (-R_{ld} I_{ld}) dt$$

c. Equation de la « FEM Sub-transitoire »

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

d. Equations mécanique

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

$T_j \frac{d}{dt} s + (\Phi_{ad} I_q - \Phi_{aq} I_d) = M_T$ ou $T_j \frac{d}{dt} s = M_T - M_e$

$j \frac{d\omega}{dt} + \frac{P_e}{\omega_s} = M_T$

e. Equation de l'AVR et du PSS

$V_R = \frac{K_A V_E - V_R}{T_A}$, $V_E = V_{ref} - V_f$

$$\Delta input = \begin{cases} \Delta P, \int p \\ or \\ \Delta \omega = \omega_{mach} - \omega_0 \\ and \\ \Delta I_f = I_f - I_{f0} \\ and \\ \Delta U_f = U_f - U_{f0} \end{cases}$$

f. Equation de la ligne du réseau infini

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

La machine synchrone reliée à un réseau de puissance infini peut se présenter par un circuit monophasé équivalent avec :

Le : l'inductance équivalente, Re : la résistance équivalente.

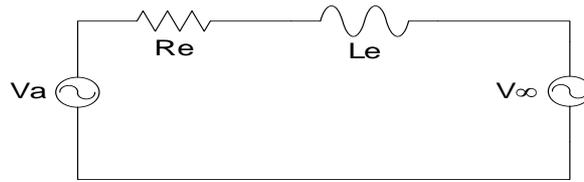


Fig. 2 – Le schema simplifié du SMIB

3. Théorie de la commande robuste H2 ET H∞

Par définition, la commande robuste d'un SEE est un type de commande qui vise à garantir sa stabilité et ses performances face aux perturbations du milieu externe et les incertitudes du modèle mathématique simplifié[13]. En outre, et afin d'évaluer et quantifier la robustesse par un nombre unique on fait appels aux normes mathématiques H2 et H∞ de l'espace de Hilbert[14].

Soit $G(s)$ le système LTI (linéaire à temps invariant), multi variable (MIMO) défini par:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

Avec $D=0$ (système strictement propre), On définit la norme H2 et H∞ respectivement de ce système par :

$$\|G(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}(G(-j\omega)^T G(j\omega)) d\omega} \quad \|G(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(G(j\omega)) = \sup_{U(s) \neq 0 \in L_2} \frac{\|Y(s)\|_2}{\|U(s)\|_2}$$

Avec : $\bar{\sigma}$ la valeur singulière maximale.

La synthèse H∞ et H2 utilise la notion de problème standard [10]. L'objectif principal d'une telle représentation (forme standard) est d'apporter une facilité méthodologique à la résolution des problèmes de type H∞ /H2. En effet, elle permet d'apporter une certaine clarté de formulation puisqu'elle contient à la fois le système à commander et le cahier des charges associé caractérisé par des filtres de pondération. La représentation est illustrée dans la Figure suivante.

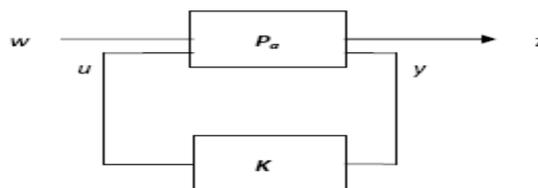


Fig. 3 –La forme du problème standard

Où $P(a)$ représente le modèle de synthèse augmenté des pondérations traduisant les objectifs de performance et de robustesse et $K(s)$ le correcteur. La matrice de transfert $P(s)$ modélise les interactions dynamiques entre deux ensembles d'entrées w , u et deux ensembles de sorties z , y . Elle est formée des quatre transferts existants entre les entrées u (commande du système) et w (entrées exogènes : consignes, perturbations, bruits...) et les sorties y (mesures pour élaborer la commande) et z (sorties régulées, ou grandeurs à surveiller).

La norme H_2 , minimise la transmission des perturbations (w) sur la sortie commandée (z), le gain optimal H_2 est obtenu en résolvant les équations de Riccati ou un problème d'optimisation convexe formé par des LMI's (inégalités Matricielles Linéaires) [9]. En revanche, la norme H_∞ correspond à la valeur maximale de la plus grande des valeurs singulières du transfert entre Y et U sur l'ensemble des fréquences ω , donc au gain maximal de la réponse fréquentielle $G(j\omega)$. La norme H_∞ cherche en réalité, contrairement à la norme H_2 , la fréquence pour laquelle la puissance transmise lors du transfert entre U et Y sera la plus grande possible. Autrement dit, la fréquence la plus défavorable. Ainsi, la norme H_∞ permettant de garantir un certain niveau de performance pour la fréquence la plus défavorable, elle le garantit a fortiori pour les autres fréquences.[10]

3.1. Commande Quadratique Gaussienne (LQG) avec filtre de Kalman

Puisque l'état du système LTI n'est pas mesurable, on s'intéresse par la commande Linéaire Quadratique Gaussienne avec un filtre de Kalman utilisé comme un estimateur. La commande H_2 consiste à trouver un correcteur $K(s)$ stabilisant de manière interne $P(s)$ et minimisant la norme H_2 de la matrice de transfert en boucle fermée de w vers z . Notons que $P(s)$ est un système augmenté à partir du système nominal et prenant en compte des spécifications de performance et de robustesse.

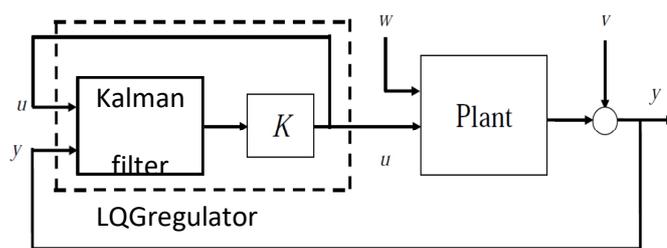


Fig. 4 – Le contrôleur LQG avec le filtre de Kalman

3.2. Commande H_∞ par LOOP –SHAPING

Le système "Pa" augmenté avec les fonctions de pondération W_1 , W_2 , W_3 est donné par l'équation suivante :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A_G & 0 & 0 & 0 & 0 & B_G \\ -BW_1C_G & AW_1 & 0 & 0 & BW_1 & -BW_1D_G \\ 0 & 0 & AW_2 & 0 & 0 & BW_2 \\ BW_3C_G & 0 & 0 & AW_3 & 0 & BW_3D_G \\ -DW_1C_G & CW_1 & 0 & 0 & DW_1 & DW_1D_G \\ 0 & 0 & CW_2 & 0 & 0 & DW_2 \\ DW_3C_G & 0 & 0 & CW_3 & 0 & DW_3D_G \\ C & 0 & 0 & 0 & 1 & D_G \end{bmatrix}$$

Pour résoudre le problème optimal, la procédure γ -itération, consiste à varier la valeur de γ pour avoir des solutions dites sous-optimales qui correspondent à :

$$\|T_{ZW}\|_{\infty} \leq \gamma$$

γ : C'est une valeur constante positive qui représente le niveau d'optimisation.

Considérons le problème standard de la figure 3, la représentation d'état du système $P(s)$ sera donnée par la forme :di

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } e \in \mathcal{R}^{p_1}; y \in \mathcal{R}^{p_2}; x \in \mathcal{R}^{m_n}$$

Pour résoudre le problème H_2 standard, les hypothèses suivantes doivent être satisfaites:

(H₁) (A, B₂) est stabilisable et (C₂, A) est détectable.

(H₂) rang (D_{1 2}) = m₂ et rang (D_{2 1}) = p₂

(H₃) $\forall w \in \mathcal{R} \text{ rang} \begin{pmatrix} A - jwl_n & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{pmatrix} = n + m_2$

(H₄) $\forall w \in \mathcal{R} \text{ rang} \begin{pmatrix} A - jwl_n & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{pmatrix} = n + p_2$

Nous ajouterons les conditions suivantes :

$$D^{11} = 0 \quad D^{12} \text{ } ^T (C_1 \quad D^{12}) = (0 \quad I_{n2})$$

$$D^{22} = 0 \quad \begin{pmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{pmatrix} \cdot D_{12} \text{ } ^T = \begin{pmatrix} 0 \\ I_{p2} \end{pmatrix}$$

La synthèse globale du correcteur robuste s'effectue par la résolution des deux équations de Riccati et le système (Ps) vérifiant les hypothèses H₁- H₄ avec les deux conditions ajoutées, peut être stabilisé par un correcteur K (s) assurant : $\|fi(p, K)\|_2 < \gamma$ si et seulement si :

i) La matrice

$$H_{\infty} = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ -C_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix}$$

n'a pas de valeur propre sur l'axe imaginaire, et il existe une unique matrice $X_{\infty} = R(H_{\infty}) \geq 0$.

ii) La matrice $J_{\infty} = \begin{pmatrix} A^T & -\gamma^2 C_1 C_1^T - C_2 C_2^T \\ B_1 B_1^T & -A \end{pmatrix}$ n'a pas de valeur propre sur l'axe imaginaire, et il existe une unique matrice .

$$Y_2 = R(J_2) \geq 0 .$$

Avec : H et J deux matrices de HAMILTHON.

3.3 .Synthèse des contrôleurs robustes PSS-H2 et PSS-H ∞ par l'Algorithme de Glover-Doyle

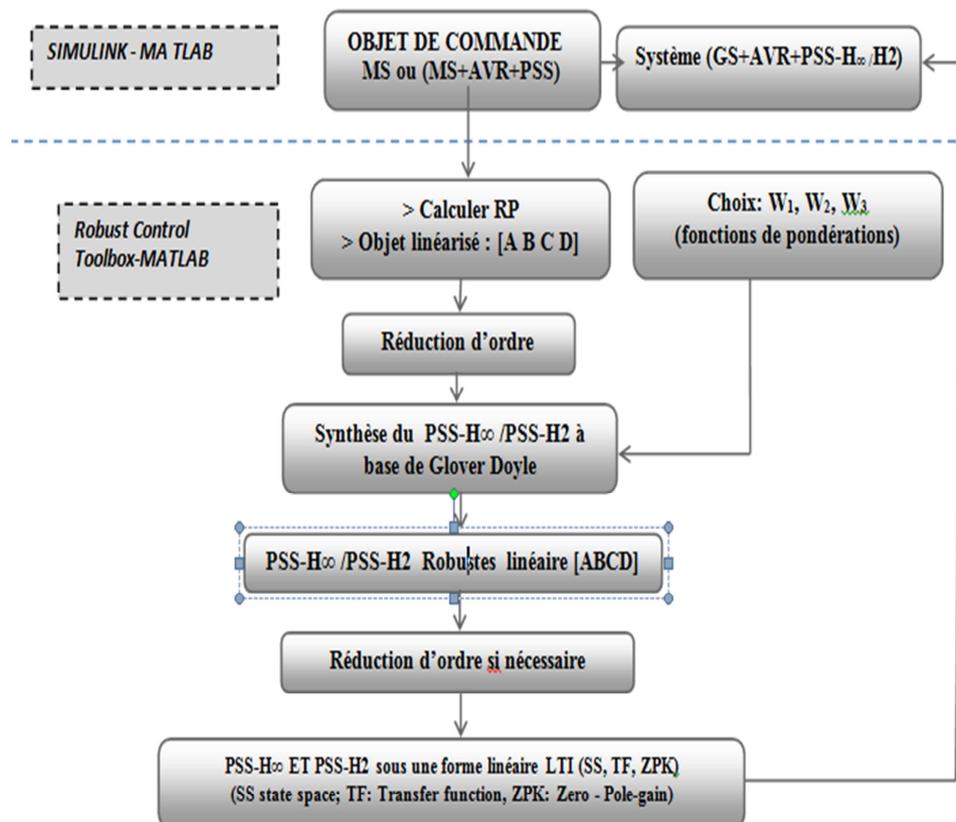


Fig. 5. L'algorithme de Glover-Doyle

4. Méthodologie de travail

Sous les régimes nominale , sous-excité (fourniture de l'énergie réactive lors de la nuit) et sur- excité (période de pointe), et avec une ligne de transport courte $X_l=0.3$ (p.u), le système SMIB est simulé avec Matlab-Simulink dans les trois cas suivants :

- Système en Boucle Ouverte BO (sans régulation) ;
- Système en boucle fermée avec le régulateur conventionnel PSS+AVR classique (PID) ;
- Système en boucle fermée avec les deux contrôleurs robustes PSS-H2 et PSS-H ∞ .

Ensuite, et après avoir constaté l'amélioration de la stabilité de la boucle fermée par rapport à celle ouverte,(la nécessité d'une régulation), nous avons effectué deux tests de robustesse ,en variant simultanément à l'instant $t=4$ seconde la résistance rotorique -paramètre électrique- (majoration à 100%) ,et la constante d'inertie -paramètre mécanique-.(minoration à 25%).dans les figures (8 à 14) la tension statorique « Ug ».(la tension terminale) est visualisée .

4.1. Résultats de simulation

Les figures 6 à 12 présentent les résultats de simulation du système « SMIB » avec les deux tests de robustesses indiqués ci-dessus.

Dans Le tableau 1 ,les erreurs statiques (en %) et les Temps d'établissement (Ts) sont calculées.

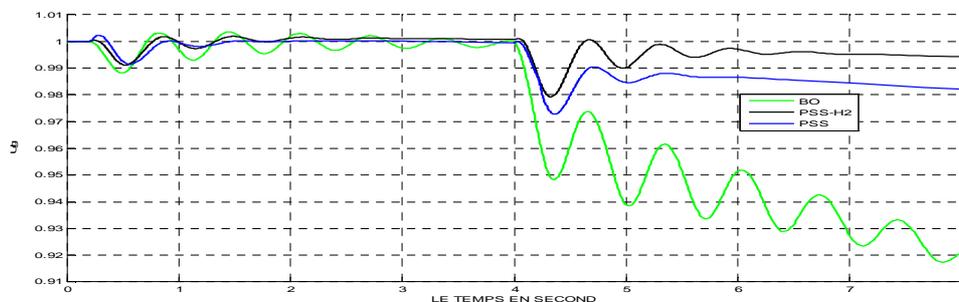


Fig. 6 – la tension statorique « Ug » en régime nominal et ligne courte en BO et BF avec PSS classique et PSS-H2 robuste

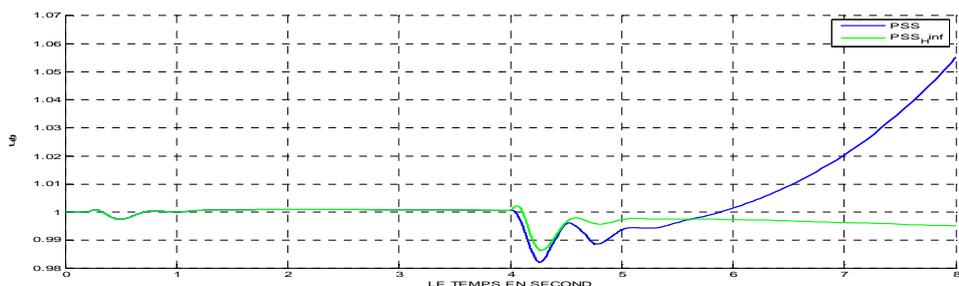


Fig. 7 – la tension statorique « Ug » en régime nominal et ligne courte en BF avec PSS classique et PSS-H ∞ robuste

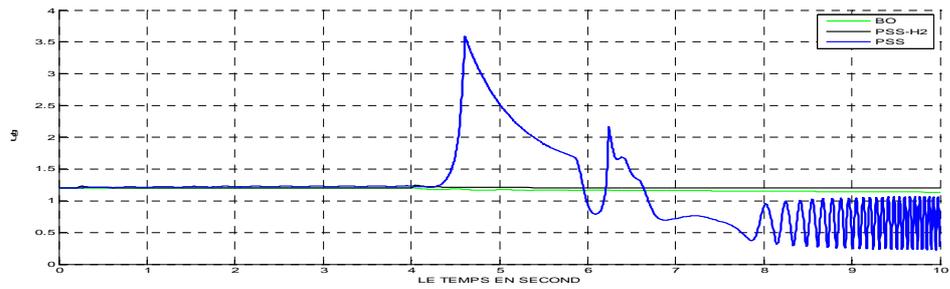


Fig. 8 – La tension statorique « U_g » en régime sous-excité et ligne courte en BO et BF avec PSS classique et PSS-H2 robuste

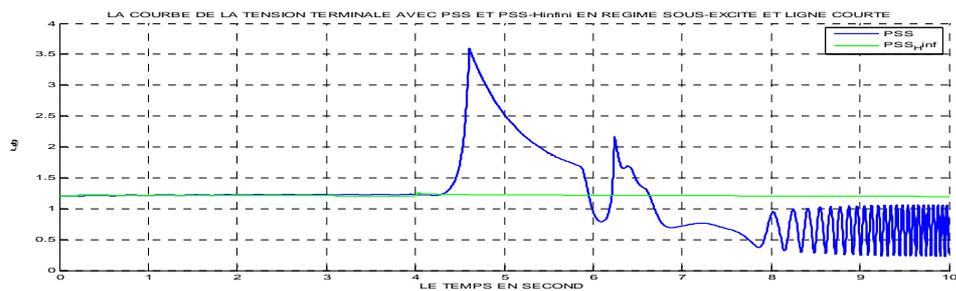


Fig. 9– La tension statorique « U_g » en régime sous-excité et ligne courte en BF avec PSS classique et PSS-H2 robuste

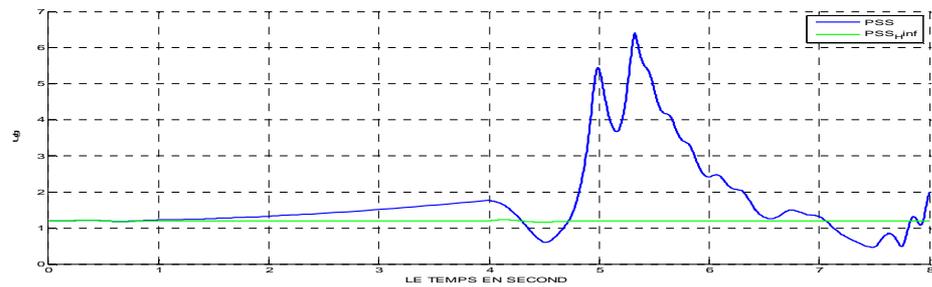


Fig. 10 – La tension statorique « U_g » en régime sous-excité et ligne courte en BF avec PSS classique et PSS-H2 robuste

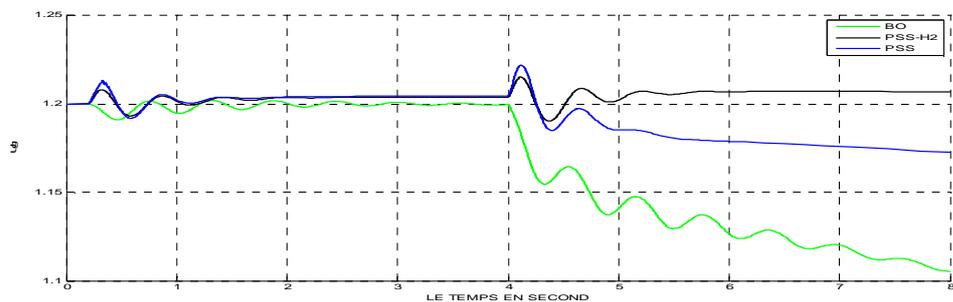


Fig. 11 – la tension statorique « U_g » en régime surexcité et ligne courte en BF avec PSS classique et PSS-H ∞ robuste

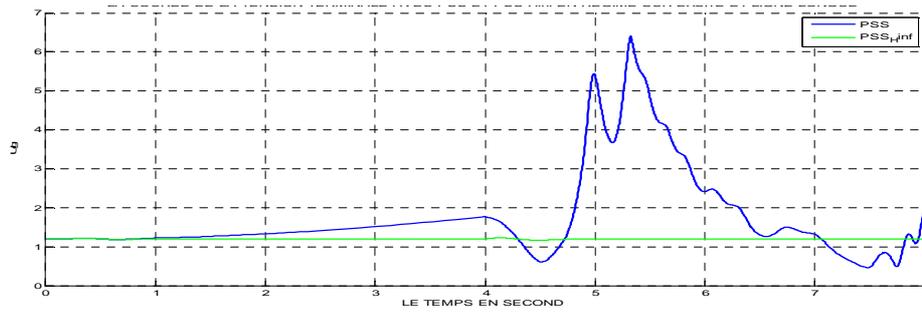


Fig. 12 – la tension statorique « Ug » en régime sur-excité et ligne courte en BF avec PSS classique et PSS-H ∞ robuste

ERREUR STATIQUE (EN %)				
Q	BO	PSS	PSS-H ₂	PSS-H ∞
-0.160	Instable	3.761	1.620	Négligeable
-0.222	Instable	3.731	1.629	Négligeable
0.2139	9.2442	3.855	1.487	Négligeable
0.1634	9.2354	3.759	1.235	Négligeable
0.5746	8.2095	3.470	0.687	Négligeable
0.5663	8.2080	3.442	0.656	Négligeable
TEMPS D'ETABLISSEMENT Ts POUR 5% (secondes)				
Q	BO	PSS	PSS-H ₂	PSS-H ∞
-0.160	Instable	1,704	0.835	0.213
-0.222	Instable	1,713	0.884	0.246
0.2139	-	1,617	0.805	0.222
0.1634	-	1,706	0.794	0.201
0.5746	14,320	2,041	0.964	0.315
0.5663	14,423	2,080	0.973	0.329

Tableau 1.les performances dynamiques du SMIB en BO et avec PSS,PSS-H2 et PSS-H ∞

4.2. Analyse des résultats obtenus

A partir de l'instant t=4 sec, (instant d'injection de deux variations paramétriques : majoration de la résistance rotorique et minoration du couple d'inertie, on constate que :

- le PSS-PID classique ne résiste plus à la variation des paramètres mécaniques et électriques, il se comporte comme un système en boucle ouverte, en engendrant des oscillations non-amorties, le PSS-PID n'est plus robuste.
- Le PSS-H2 a pu quand même résister à ces deux variations paramétriques, mais après de légères fluctuations autour de l'instant $t=4$ second il commence à perdre son efficacité, juste après apparition des propriétés non-linéaires réels du système SMIB; le PSS-H2 est peut (moins) robuste.
- Par contre, le PSS- H_{∞} en ce moment après apparition des propriétés non-linéaires réels du système SMIB, a apporté des meilleures améliorations des qualités des régimes transitoires, même pour le cas de notre régime critique qui est le régime de repos de la station (sous-excité), en effet, face à deux variations paramétriques injectés simultanément à l'instant $t=4$ sec, le système SMIB muni d'un PSS- H_{∞} robuste retrouve son état initial avec des erreurs statiques négligeables et des temps d'établissements très court (système très rapide). Le PSS- H_{∞} est le stabilisateur le plus robuste.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons choisi le SEE dit Simple Standard IEEE-SMIB, puis modélisé ses éléments mathématiquement dans le but de lancer des simulations numériques de son fonctionnement sous Matlab-Simulink. Dans ce cadre, nous sommes arrivées à synthétiser trois contrôleurs de la tension d'excitation des génératrices synchrones à savoir : un PSS –PID classique, et deux PSSs robustes de type H2 et H_{∞} . Les résultats de simulation avec les différents régimes de fonctionnement : régime nominale, sous –excité et surexcité montrent la supériorité et l'excellence du stabilisateur robuste PSS- H_{∞} par rapports au PSS-H2 aussi bien PSS-PID, car il a engendré les meilleures performances statiques et dynamiques d'une part (stabilité), et il a pu résisté devant les variations paramétriques mécaniques et électriques d'autre part (robustesse).

6. References

- [1] K. Saoudi « Stabilisateurs Intelligents des systèmes électro énergétiques », thèse de Doctorat, université Ferhat Abbes-Setif, Novembre 2014.
- [2] Y.Bésanger « Vers l'amélioration de la sécurité des réseaux électriques de puissance », habilitation à diriger des recherches, l'INP de Grenoble, 4 Décembre 2006.
- [3] P.M.Anderson et A.A.Fouad "Power System Control and Stability", IOWA State University Press 1977.
- [4] P.Kundur, M.Klein, G.J.Rogers et M.S.ZYUNO « Application of Power System Stabilizers for enhancement of overall system stability », IEEE Trans, Power System, Vol 4, 10, 2, pp.614-626, 1989.
- [5] P. S. Rao et I. Sen, Robust pole placement stabilizer design using linear matrix inequalities, IEEE Trans. on Power Sys., vol. 15, no. 1, pp. 313–319, 2000.
- [6] C.T. Tse, et S.K. Tso, Refinement of conventional PSS design in multimachine system by modal analysis, IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 2, pp. 598–605, 1993.

- [7] ABB & Alstom Power : www.abb-alstom-power.com
- [8] B.Nedjar Modélisation basée sur la méthode des réseaux perméancesde simulation en vue del'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation.these de Doctorat ,Cachan ,France 2012
- [9] Zhou K., Doyle J.C, Glover K. "Robust and optimal control. Englewood Cliffs", NJ: Prentice Hall, 1
- [10] S.Hassaine,Application des nouvelles techniques de commande de la Machine Synchrone à Aimants Permanents,these de doctorat USTO-MB ,2008.