
Soumis le : 25/12/2013

Forme révisée acceptée le : 18 12.2015

Email de l'auteur correspondant :

E-mail: jamelbel22@yahoo.fr

Nature & Technology

Commande robuste H_∞ optimisée par l'algorithme génétique appliquée à la régulation automatique d'excitation des générateurs synchrones puissants (Application sous GUI/MATLAB)

GHOURAF Djamel Eddine ^a, NACERI Abdellatif ^a

^a. Département d'électrotechnique, Université UDL de Sidi Bel Abbes Laboratoire IRECOM, BP 98, SBA, ALGERIE

E-MAIL : jamelbel22@yahoo.fr

Résumé

Cet article présente une étude d'optimisation par les algorithmes génétiques (AG) des fonctions de pondérations pour la synthèse d'un contrôleur robuste H_∞ par la méthode de loop shaping appliqué à la régulation automatique d'excitation des générateurs synchrones puissants (turboalternateurs) pour améliorer la robustesse de la stabilité et les performances dynamiques du système électro-énergétique simple standard type SMIB (Single Machine Infinity Bus System). L'ajout d'un stabilisateur de puissance, comme auxiliaire du système d'excitation du générateur pour amortir les oscillations électromécaniques, améliore la stabilité du système électro-énergétique. Par conséquent, les paramètres du PSS sont optimisés afin d'assurer un amortissement satisfaisant. L'application de technique d'optimisation par les algorithmes génétiques (AG) à la commande robuste H_∞ et au stabilisateur de puissance PSS avec le test de robustesse vis-à-vis des variations des paramètres électriques et mécaniques de la machine, montrent des améliorations considérables des performances dynamiques et une grande robustesse de stabilité et une adaptation du contrôleur robuste H_∞ avec des variations incertaines. Notre présent travail effectué à l'aide d'un GUI qu'on a réalisé sous logiciel MATLAB.

Mots-clés Générateurs synchrones puissants; control automatique d'excitation AVR-PSS; commande robuste H_∞ ; système électro-énergétique; les algorithmes génétiques (AG), GUI-MATLAB.

1. Introduction

La stabilité des systèmes électro-énergétiques 'SEE' est considérée comme condition nécessaire de fonctionnement normal d'un réseau électrique. Le rôle des systèmes de régulation et de contrôle est d'assurer cette stabilité en déterminant les éléments essentiels qui influent sur celle-ci.

Le système AVR - PSS [1] joue un rôle très important dans l'amélioration des performances dynamiques des systèmes électro-énergétique, en maintenant un niveau de tension terminale bien stable, par action sur le système de régulation d'excitation des groupes turboalternateurs. Par ailleurs, et vue le développement rapide et la modernisation des structures des systèmes électro-énergétique, ainsi que la complication des conditions de fonctionnement des stations électriques (configuration réseaux - régimes stations), et en présence des perturbations incertaines (incertitudes), nous a obligé la

recherche d'autres structures plus efficaces et plus fiables des systèmes AVR-PSS, capables de résoudre le problème de robustesse de stabilité, et de garantir un niveau acceptable des performances exigées des systèmes SEE [2,3]. Dans ce contexte, et vue le développement technologique de l'électronique de puissance et des théories de l'automatique, une très grande attention a été donnée ces dernières années à l'application de ces méthodes modernes de l'automatique, et plus particulièrement des techniques fréquentielles avancées de la commande robuste H_2 et H_∞ [4,5].

En pratique, on essaye de transformer des spécifications en terme de marge de robustesse, de rejet de perturbation et de bruit, de performance en régulation en un problème d'optimisation d'un critère H_∞ . Pour ce faire, ce sont les fonctions de pondération fréquentielle qui jouent ce rôle. En effet, un choix judicieux de ces fonctions donne au correcteur synthétisé les propriétés désirées. Par ailleurs, on peut également souhaiter optimiser plusieurs critères à la fois comme un critère de performance et un critère de robustesse ce qui nécessite le

plus souvent un compromis. Différentes approches pour la synthèse multi-critère sont à explorer : Optimisation des fonctions de pondération par application des méthodes modernes comme les Algorithmes évolutionnaires (génétiques par exemple), colonie de fourmis (ANT-colony)...etc.

Les algorithmes génétiques restent à nos jours les méthodes évolutionnaires les plus utilisés dans le domaine de la commande. Ils peuvent être exploités par exemple pour obtenir les valeurs optimisées des paramètres des régulateurs PID, LQG, H_∞ . L'avantage des AG par rapport à d'autres techniques d'optimisation est leur indépendance par rapport à la complexité des systèmes. De plus, ils travaillent sur un ensemble de points (une population) et non sur un seul point. L'AG est donc une méthode d'optimisation globale. [6].

2. Modélisation du système électro-énergétique:

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).

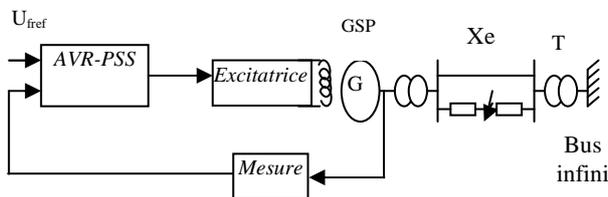


Fig.1. Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant

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 la figure 2

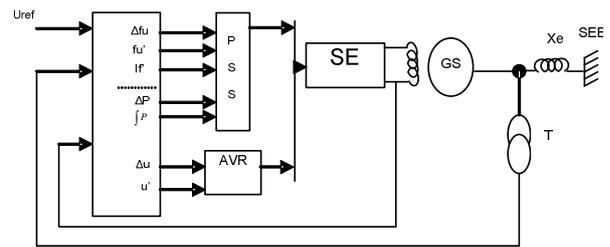


Fig.2. Schéma fonctionnel du système de commande avec PSS pour GSP

2.1. La modélisation par réseaux de permeanances (PARK-GARIOV) du générateur synchrone puissant

Dans cet article on a basé sur la modélisation par réseaux de permeanances (pour éliminer des hypothèses simplificatrices et tester l'algorithme de commande) de la machine, dite modèle PARK-GARIOV [4,7], qui est définie par les équations et les figure 3 et 4 suivantes :

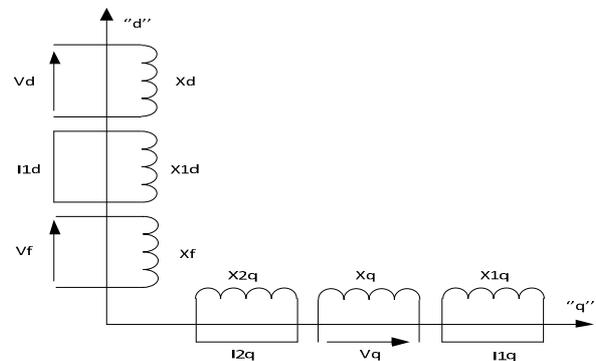


Fig.3. Transformation de PARK de la machine synchrone [8]

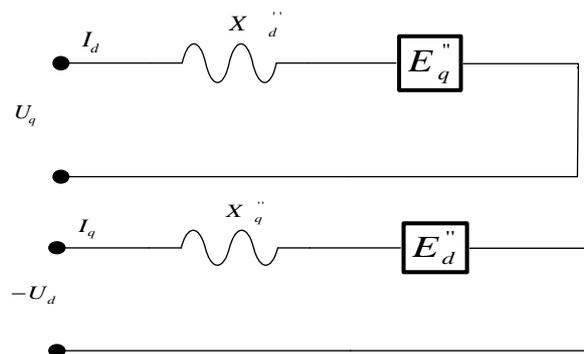


Fig.4. Schémas équivalents simplifiés de la machine synchrone avec circuits amortisseurs (modèle PARK-GARIOV)

• *Système d'équations des courants et FEM subtransitoire :*

$$\begin{aligned}
 I_q &= (U_q - E_q'') / X_d'' & I_{1q} &= (\Phi_{1q} - \Phi_{aq}) / X_{sr1q} \\
 I_d &= -(U_d - E_d'') / X_q'' & I_{2q} &= (\Phi_{2q} - \Phi_{aq}) / X_{sr2q} \\
 I_{1d} &= (\Phi_{1d} - \Phi_{ad}) / X_{sr1d} & I_f &= (\Phi_f - \Phi_{ad}) / X_{sr}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

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

• *Système d'équations des flux:*

$$\begin{aligned} \Phi_{ad} &= \int_0^t (X_d' - X_s) I_d dt & \Phi_{aq} &= E_d'' + (X_q' - X_s) I_q \\ \Phi_f &= \omega_s \int_0^t (-R_f I_f + U_{f0}) dt & \Phi_{ld} &= \omega_s \int_0^t (-R_{ld} I_{ld}) dt \\ \Phi_{lq} &= \omega_s \int_0^t (-R_{lq} I_{lq}) dt & \Phi_{2q} &= \omega_s \int_0^t (-R_{2q} I_{2q}) dt \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

$$\begin{aligned} M_T + M_j + M_e &= 0 \quad \text{avec } M_j: \text{moment d'inertie} \left(M_j = -j \frac{d\omega}{dt} \right) \\ T_j \frac{d}{dt} s + (\Phi_{ad} I_q - \Phi_{aq} I_d) &= M_T \quad \text{ou} \quad T_j \frac{d}{dt} s = M_T - M_e \\ j \frac{d\omega}{dt} + \frac{P_e}{\omega_s} &= M_T \end{aligned} \quad (5)$$

2.3. 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 5.

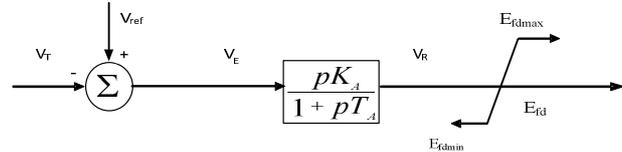


Fig.5. Schéma du circuit d'excitation (AVR) « IEEE » type-5 simplifié

Le Signal de sortie de l'AVR est donné par :

$$\text{Avec } : V_R = \frac{K_A V_E - V_R}{T_A} \quad \text{et} \quad V_E = V_{ref} - V_F \quad (6)$$

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].

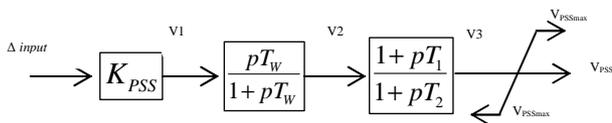


Fig.6. Schéma fonctionnelle du PSS utilisé [8]

Le Signal du PSS est donné par [8] :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{V_2 - V_1}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} \dot{V}_2 & ; & \quad \dot{V}_2 = \frac{V_3 - V_2}{T_2} + \frac{T_3}{T_2} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_3 &= \frac{V_3 - V_1}{T_w} & ; & \quad \dot{V}_1 = K_{pss} \cdot \Delta input \end{aligned} \quad (7)$$

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

2.4. Modèle simplifié du système SMIB étudié

Considérons le système de la figure 7. 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 [7].

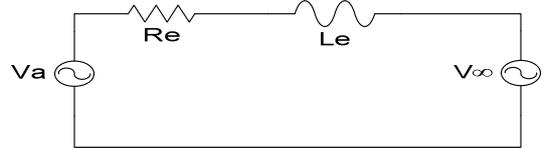


Fig.7. Machine synchrone connectée à un réseau bus infini

On définit l'équation suivante du système SMIB :

$$V_{-ndq} = P V_{-abc} = \sqrt{2} V_m \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} + L_e I'_{ndq} + X_c \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

2. La Commande robuste H_∞ appliquée au système électro-énergétique:

2.1. Formulation et résolution du problème commande :

La commande robuste H_2 ou H_∞ (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, 4, 5].

Le problème de commande robuste H_∞ standard est défini de la manière suivante (figure 8) [5] :

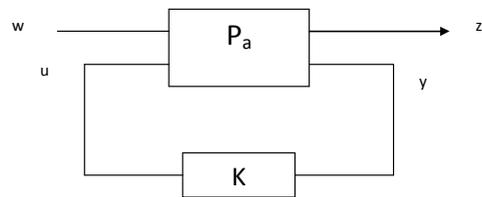


Figure 8. Le problème standard H_∞

La matrice de transfert $P(s)$ (équation 2) décrit un système comprenant deux entrées et deux sorties avec :

- z : vecteur des sorties commandées;
- w : vecteur des entrées du critère H_∞ ;
- y : vecteur des sorties mesurées;
- u : vecteur des entrées de commande.

Le système Pa admet une représentation d'état définie par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (10)$$

Notons que P(s) est un système augmenté à partir système nominal et prenant en compte des spécifications de performance et de robustesse, définie par [13]:

$$P(s) = \begin{bmatrix} A_o & 0 & 0 & 0 & 0 & B_o \\ -BW_1 C_o & AW_1 & 0 & 0 & BW_1 & -BW_1 D_o \\ 0 & 0 & AW_2 & 0 & 0 & BW_2 \\ \hline BW_3 C_o & 0 & 0 & AW_3 & 0 & BW_3 D_o \\ -DW_3 C_o & CW_1 & 0 & 0 & DW_3 & DW_3 D_o \\ 0 & 0 & CW_2 & 0 & 0 & DW_2 \\ DW_1 C_o & 0 & 0 & CW_3 & 0 & DW_1 D_o \\ C & 0 & 0 & 0 & 1 & D_o \end{bmatrix} \quad (11)$$

A, B₁, B₂, C₁, C₂, D₁₁, D₁₂, D₂₁, D₂₂ : Matrices à dimensions correspondent (dans la plupart des cas D₁₁ et D₁₂ sont nulles).

W_{1,2,3}: Fonctions des pondérations.

La figure 9 représente le système augmenté par les fonctions des pondérations.

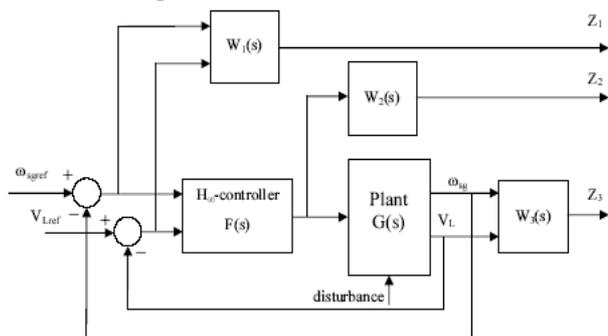


Fig.9 Diagramme de block simplifié de plant augmenté

La recherche d'un contrôleur stabilisant K(S), est obtenue par résolution de:

- Problème standard : $\text{Find } K(s) \text{ stabilising } \|T_{zw}\|_{\infty} \leq \gamma_{\min} \quad (12)$

- Problème optimal : $\text{Min } K(s) \text{ stabilising } \|T_{zw}\|_{\infty} \quad (13)$

T_{zw} : Matrice de transfert du signal d'entrée w vers le signal de sortie z

γ: valeur constante positive appelé niveau d'optimisation.

Le problème standard consiste à trouver un correcteur K(s) stabilisant de manière interne P(s) et minimisant la norme H_∞ de la matrice de transfert en boucle fermée de w vers z.

Notons que ce contrôleur est de même ordre que le système augmenté par les fonctions de pondérations.

On peut donner le contrôleur robuste K(s) par :

$$K(s) = -F_{\infty} [(SI - A_2)^{-1}] Z_{\infty} L_{\infty} \quad (14)$$

3. 2 L'Algorithme de GLOVER - DOYLE pour synthétiser un stabilisateur robuste PSS-H_∞

La résolution du problème de commande standard est proposée comme suit [4]:

1. Calcul du régime permanent établi (RP) ;
2. Linéarisation de l'objet de commande (GS+PSS+AVR)
3. Le problème principal dans la commande H_∞ et la définition de l'objet de commande augmenté P(s) dans l'espace d'état :

3-1. Choix des fonctions de pondérations : W₁, W₂, W₃

3-2. L'obtention de l'objet de commande augmenté à partir des fonctions de pondérations W_{1,2,3}.

4. Vérifier si toutes les conditions aux rangs des matrices sont satisfaites, si non on change dans la structure des fonctions des pondérations ;

5. Choix d'une valeur de γ (niveau d'optimisation) ;

6. Résolution des deux équations de RICCATI définies par les deux matrices de HAMILTHON H et J ;

7. Réduction de l'ordre du régulateur si nécessaire

8. Par l'obtention des valeurs optimales et deux solutions d'équations de RICCATI on obtient la structure du régulateur H_∞ ainsi que les racines de la boucle fermée avec le régulateur robuste ;

9. Les paramètres du contrôleur robuste H_∞ sous forme linéaire 'LTI (SS espace d'état, TF fonction de transfert ou ZPK zéros - pôles - gains)

10. 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 différents conditions de fonctionnements.

L'algorithme de synthèse du contrôleur d'excitation robuste H_∞ proposé dans ce travail est clairement schématisé par l'organigramme de la figure 10

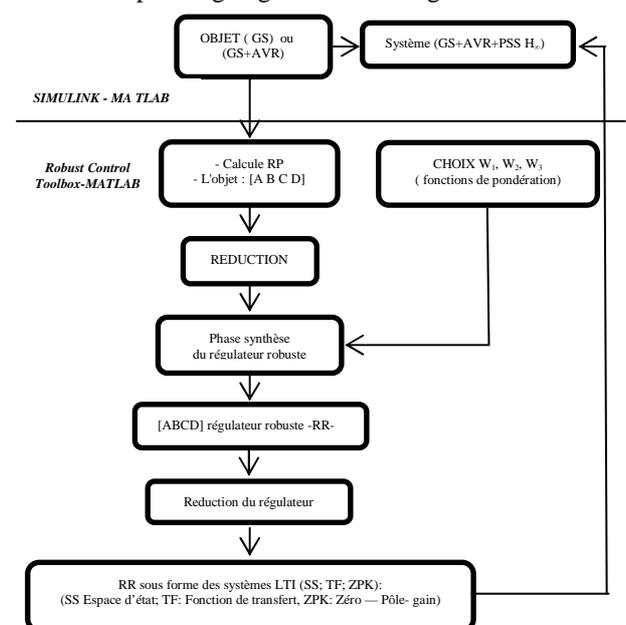


Fig.10 Algorithme de synthèse du régulateur robuste d'excitation pour une seule machine

3.3 Structure du Système Electro-Energétique Avec les Contrôleurs Robustes H_∞

On utilise la structure de base du système de commande d'un générateur synchrone puissant avec le régulateur robuste illustré sur la figure 11 [5]

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.

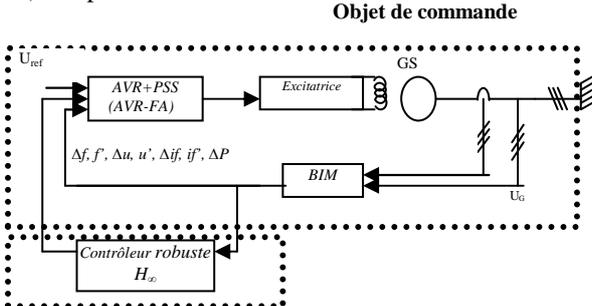


Fig 11. Structure de base du générateur synchrone avec le contrôleur robuste

4. Optimisation Par Algorithmes Génétiques

4.1 Introduction

D'une manière générale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante. La figure 12 représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland [6]

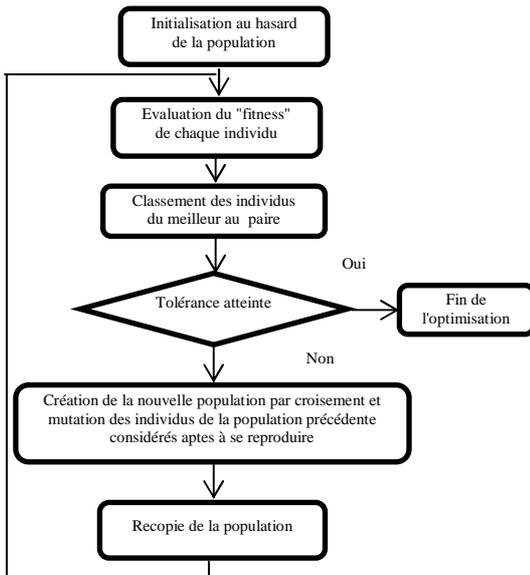


Fig.12. Organigramme de l'algorithme génétique

4.2. Description des étapes de l'optimisation par AG

Dans ce qui suit, nous allons décrire plus en détail les différentes étapes du simple algorithme génétique [10]:

1) *Codage et initialisation* : La première étape dans la procédure d'un algorithme génétique est le codage des paramètres du problème afin de constituer les chromosomes. Le type de codage le plus utilisé est le codage binaire, mais d'autres types peuvent être utilisés, par exemple le codage ternaire, entier, réel etc. Le passage de la représentation réelle à la représentation codée se fait grâce à des fonctions de codage et décodage.

2) *Evaluation* : L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction objective (fonction à optimiser) appelée fonction fitness. C'est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu. Un individu ayant une grande valeur fitness représente une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur fitness représente une solution médiocre.

3) *Sélection* : La sélection, dans les algorithmes génétiques, joue le même rôle que la sélection naturelle. Elle suit le principe Darwinien sur la survie des individus les plus adaptés. Elle décide, en quelque sorte, quels sont les individus qui survivent et quels sont ceux qui disparaissent en se basant sur leurs fonctions fitness. Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés.

Il existe plusieurs méthodes de sélection .Nous ne citerons que deux des plus connues :

- Méthode de la roulette de loterie
- Méthode du tournoi

4) *Croisement* : Le croisement permet à un couple d'individus, parmi ceux qui sont sélectionnés, d'échanger leurs informations génétiques c.-à-d. leurs gènes. Son principe est simple : deux individus sont pris au hasard et sont appelés parents, ensuite, on tire aléatoirement un nombre P dans l'intervalle [0, 1] qu'on compare à une certaine probabilité de croisement P_c

- Si $P > P_c$ le croisement n'aura pas lieu et les parents sont copiés dans la nouvelle génération.
- Si $P \leq P_c$ le croisement se produit et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

Il existe différents types de croisement, les plus connus sont le croisement multipoints et le croisement uniforme

5) *Mutation* : L'opérateur de mutation permet d'explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et il assure la possibilité de quitter les optimums locaux. La mutation s'applique sur chaque gène de chaque individu avec une probabilité de mutation P_m en suivant le même principe que pour le croisement.

- Si $P > P_m$ la mutation n'aura pas lieu et le gène reste tel qu'il est.

- Si $P \leq P_m$ la mutation se produit, et le gène sera remplacé par un autre gène tiré aléatoirement parmi les différentes valeurs possibles. Dans le cas d'un codage binaire, cela revient tout simplement à remplacer un 0 par un 1 et vice versa

6) Critère d'arrêt: Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être formulé de différentes façons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.
- Arrêt si un certain nombre de générations est dépassé.

Exemple : On considère le cas simple d'une fonction à une variable x appartenant à l'ensemble des entiers naturels.

$$\begin{aligned} & \text{Maximiser} && F_{obj} = 4 \sin(x) + x \\ & \text{Sujet à} && 0 > x \geq 30 \end{aligned}$$

Les paramètres utilisés

- codage binaire sur 8 bits.
- l'intervalle de recherche [0,30].
- sélection utilisée la méthode de la roulette de loterie.
- croisement simple (à un point) avec une probabilité de croisement $P_c = 0.7$.
- probabilité de mutation $P_m = 0.1$.

Pour effectuer et visualiser les différentes étapes de l'algorithme génétique on a créé et élaboré un GUI (Graphical User Interfaces) sous logiciel MATLAB, ce dernier permet de calculer et visualiser les opérations d'AG (Codage et initialisation, Evaluation, Sélection, Croisement et Mutation).

La solution du problème représenté dans les figures 13 et 14

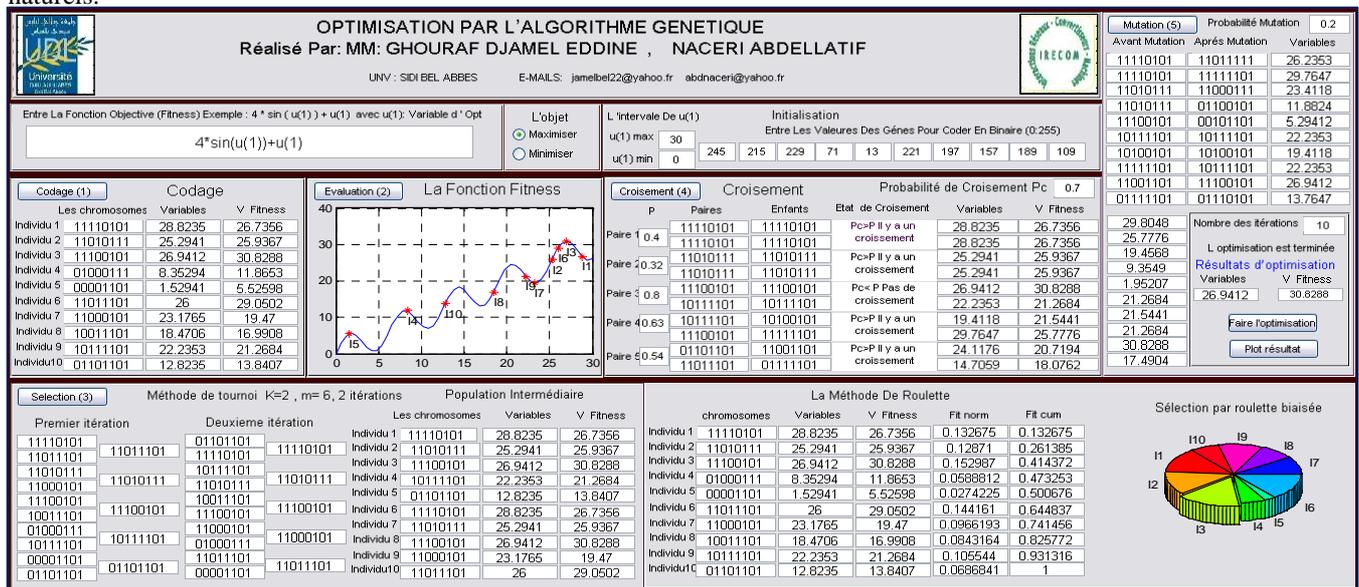


Fig 13. L'algorithme génétique sous GUI / MATLAB

La solution du problème : $x = 26.9412$, $F(x) = 30.8288$.

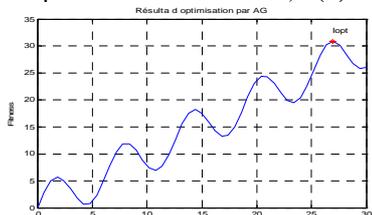


Fig14. Résultat d'optimisation par AG

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (14)$$

$$\text{Avec } \lambda = \sigma \pm j\omega \quad (15)$$

Un facteur d'amortissement ζ important aboutit à une réponse dynamique bien amortie. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limité par deux demi-droites. Pour une valeur critique du facteur d'amortissement ζ_{cr} : on impose alors une marge de stabilité relative [14].

La partie réelle de la valeur propre σ détermine la rapidité de décroissance/croissance des exponentielles composant la réponse dynamique du système. Ainsi, σ très négatif aboutit à une réponse dynamique rapide. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limité par une verticale passant par une valeur critique de la partie réelle (σ_{cr}): on définit ainsi la marge de stabilité absolue.

4.3. Application de l'algorithme génétique au PSS

A. Etude analytique de stabilité d'un système linéaire :

Rappelons que le facteur d'amortissement ζ d'un mode représenté par sa valeur propre complexe λ est donné par :

Lors du réglage des paramètres des PSS, il est souhaitable que ces deux critères soient pris en compte pour permettre une bonne régulation. La combinaison entre ces deux critères aboutit à une zone appelée zone de stabilité D, [15], figure (15). Le déplacement des valeurs propres dans cette zone garantit une performance robuste pour un grand nombre de points de fonctionnement [16].

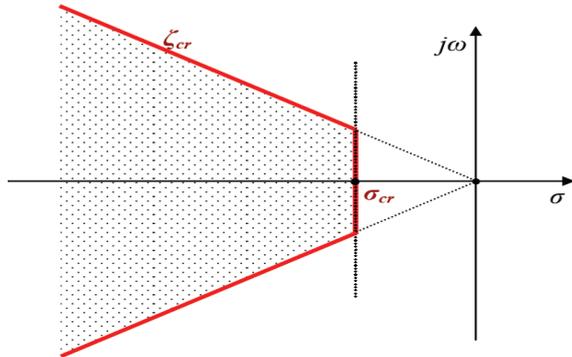


Fig 15. Zone de la stabilité D.

B. Fonction objectif

Le but de l'utilisation de PSS est d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations et de garantir la stabilité globale du système pour différents points de fonctionnement. Pour répondre à ce but, nous avons utilisé une fonction multiobjectif composée de deux fonctions objectif [17]. Cette fonction multiobjectif doit maximiser la marge de stabilité en augmentant les facteurs d'amortissement tout en minimisant les parties réelles des valeurs propres du système. Par conséquent, toutes les valeurs propres seront dans la zone D de stabilité. Les étapes de calcul de cette fonction multiobjectif sont les suivantes :

- 1- Formuler le système linéaire en boucle ouverte (sans PSS).
- 2- Positionner le PSS avec leurs paramètres initialisés par l'AG à travers une population initiale.
- 3- Calculer les valeurs propres du système en boucle fermée et prendre uniquement les modes dominants: $\lambda = \sigma \pm j\omega$
- 4- Trouver les parties réelles des valeurs propres du système (σ) et facteur d'amortissement ζ
- 5- Déterminer la valeur minimale de (ζ) et la valeur maximale de ($-\sigma$), qui peuvent être formulées respectivement comme : ($minimum(\zeta)$) et ($-maximum(\sigma)$).
- 6- Rassembler les deux fonctions objectif en une fonction multiobjectif F comme suit:

$$F_{obj} = -\max(\sigma) + \min(\zeta)$$
- 7- Renvoyer la valeur de cette fonction multiobjectif au programme de l'AG pour relancer une nouvelle génération.

La figure 16 donne l'algorithme de synthèse des paramètres du PSS.

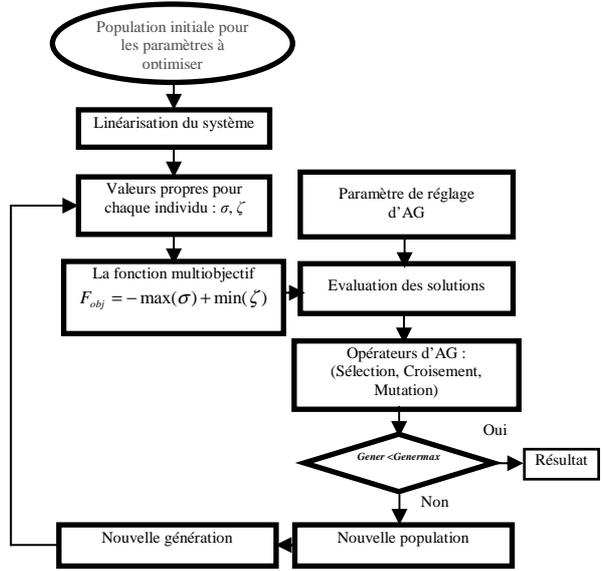


Fig 16. Organigramme de la fonction multiobjectif et du programme de l'AG.

Les paramètres optimisés utilisés pour PSS : K_{PSS} , T_w , T_1 , T_2 .

- $5 \leq K_{PSS} \leq 150$ Nombre d'individu = 120
- $0.01 \leq T_w \leq 0.05$ Nombre de génération = 100
- $0.01 \leq T_1 \leq 0.06$ Probabilité de croisement $P_c = 0.7$
- $0.01 \leq T_2 \leq 0.065$ Probabilité de mutation $P_m = 0.01$

Tableau 1 Les paramètres optimisés du PSS

Paramètres	TBB-200	TBB-500	BBC-720	TBB-1000
T_w	0.0321	0.029	0.0445	0.0234
T_1	0.054	0.0322	0.0356	0.0214
T_2	0.074	0.011	0.034	0.0142
K_{PSS}	51.43	15.45	100.548	15.506

4.4. Optimisation par l'Algorithme Génétique du contrôleur Robuste PSS- H_∞

Le but d'utilisation du contrôleur d'excitation robuste PSS- H_∞ est d'assurer primordiale la robustesse de stabilité du système électro-énergétique. Cependant les fonctions de pondérations (W_1, W_2, W_3) jouent un rôle pour la synthèse du stabilisateur PSS- H_∞ par la méthode de loop shaping (figure 17), permettent de vérifier les spécifications du cahier des charges (marge de robustesse, rejet de perturbation et le bruit). L'intérêt de l'algorithme génétique est l'optimisation des ses fonctions de pondérations [10,11].

La fonction objective (fitness) utilisée en minimisant le plus grand possible la norme H_∞ de la fonction de transfert T_{zw} par les fonctions de pondérations W_1, W_2, W_3 .

$$F_{obj} = \min(\|T_{zw}\|_\infty) \tag{16}$$

Avec :

$$\|T_{zw}\|_\infty = \begin{vmatrix} W_1^{-1} S \\ W_2^{-1} R \\ W_3^{-1} T \end{vmatrix} < \gamma \quad (17)$$

La norme H_∞ calculée par la relation suivante :

$$\|T_{zw}\|_\infty = \sup \sigma_{\max}(T_{zw}(j\omega)) \quad (18)$$

$$\frac{1}{\bar{\sigma}(S(j\omega))} \geq |W_1(j\omega)| \quad \text{et} \quad \bar{\sigma}(T(j\omega)) \leq |W_3(j\omega)| \quad (19)$$

$$W_1(s) = \frac{(T_2 s + 1)^m}{\gamma (T_1 s + 1)^n} \quad n, m \geq 1, m \leq n \quad (20)$$

$$W_3(s) = \frac{(T_3 s + 1)^k}{\gamma (T_4 + 1)^l} \quad k \geq l \quad l \leq 1$$

T_1, T_2, T_3, T_4 : périodes

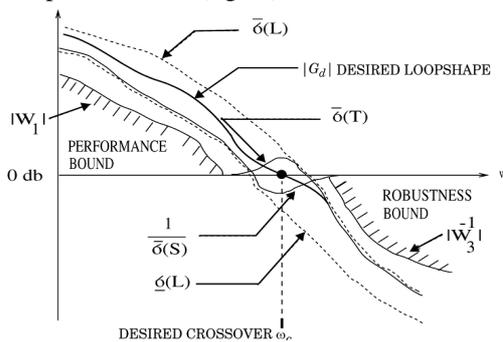
S : Sensibilité

T : Sensibilité complémentaire

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

$\bar{\sigma}$: Valeur singulière maximale.

L'équation (9) donne la notion de "loop shaping" [4] (formation de boucle) pour la synthèse d'un contrôleur robuste H_∞ , afin de satisfaire au compromis "robustesse performance" (fig 17).



Les paramètres optimisés par AG (T_1, T_2, T_3, T_4) sont donnés au tableau 1 avec plusieurs types des GSP (annexe A) :

- $0.1 \leq T_1 \leq 1.8$ Nombre d'individu = 120
- $1.9 \leq T_2 \leq 3.2$ Nombre de génération = 100
- $3.4 \leq T_3 \leq 4$ Probabilité de croisement $P_c = 0.7$
- $4.1 \leq T_4 \leq 5$ Probabilité de mutation $P_m = 0.01$

TABLEAU 3 LES PARAMETRES OPTIMISES

Paramètres	TBB-200	TBB-500	BBC-720	TBB-1000
T_1	1.05	1.029	1.0445	1.0234
T_2	2.73	3.0322	2.0356	3.0214
T_3	3.53	3.411	3.634	4.0142
T_4	4.43	4.45	4.548	4.506

L'optimisation par algorithme génétique d'un contrôleur robuste PSS- H_∞ schématisé par l'organigramme illustré sur la figure 18

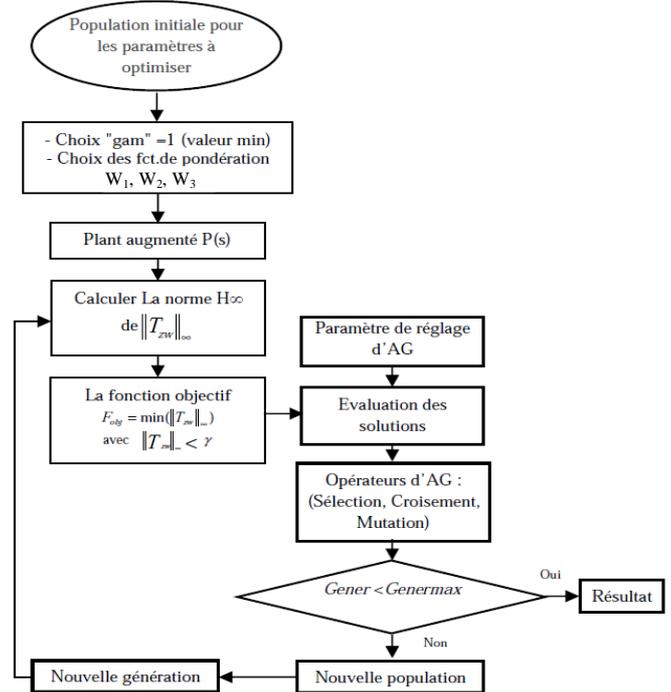


Fig.18. Organigramme de la fonction objectif et du programme de l'AG.

5. Résultats de Simulation et Discussion

5.1 Réalisation d'un Code de Calcul sous MATLAB/SIMULINK

La simulation des modèles mathématiques du système électro - énergétique étudié (Modèle par réseaux de perméances de Park-Gariov [7] de la MS avec le régulateur AVR et stabilisateur PSS relié aux Réseau de Puissance Infinie), est représentée à la figure 19 [12].

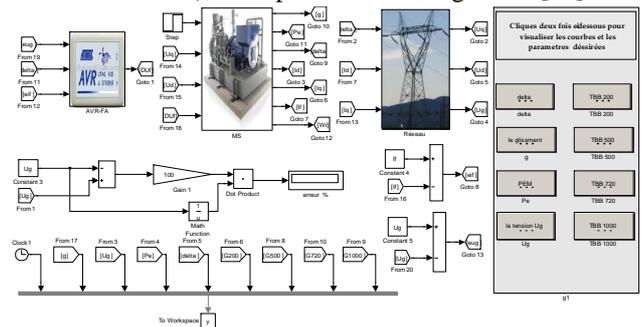


Fig.19. Structure de la machine synchrone avec le contrôleur robuste sous MATLAB / SIMULINK

5.2 Réalisation d'un GUI pour l'étude Sous MATLAB

Pour analyser et visualiser les différents comportements dynamiques avec teste de robustesse du système électro énergétique, on a 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 de régulateur robuste PSS- H_∞ ;

- D'Optimiser les paramètres des régulateurs (fonctions de pondérations) par l'Algorithme Génétique;
 - De visualiser les résultats de la régulation et la simulation de notre système ; De tester la stabilité et la robustesse du système ;
 - De calculer les paramètres dynamiques du système ;
 - D'étudier les différents régimes de fonctionnement du générateur synchrone puissant (sous excité, nominale et sur excité) avec plusieurs configurations du réseau extérieur
- Les différentes opérations ont été effectuées à partir du GUI -MATLAB réalisé (représenté à la figure. 20).

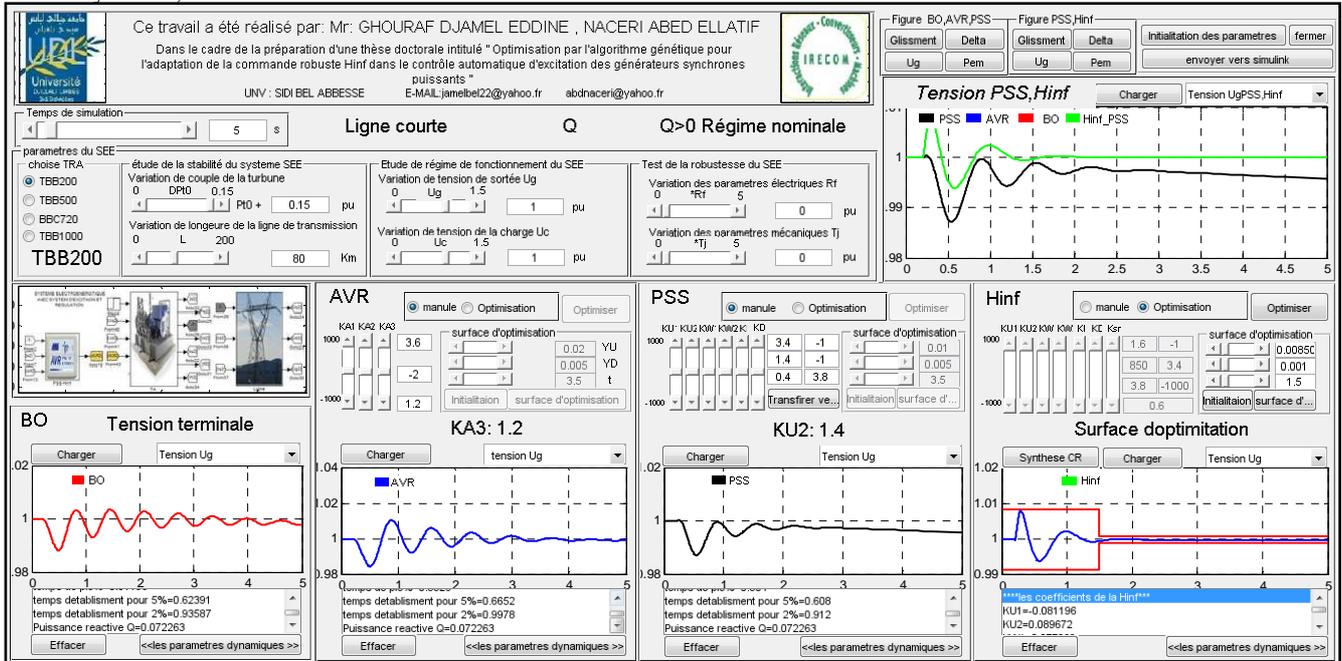


Fig.20. L'application du système sous GUI/MATLAB

5.3 Résultats de simulation et discussion

A. Étude de Stabilité

Les résultats ci-après (Tableaux et figures), ont été obtenus par l'étude des performances statique et dynamiques du système électro- énergétique étudié (type SMIB) dans les cas suivants:

- 1- Système en Boucle Ouverte 'BO' (sans régulation) ;
 - 2- Système en Boucle Fermée avec le stabilisateur PSS- FA et le contrôleur robuste PSS- H_∞ ;
 - 3-Optimisation des gains des régulateurs PSS et les fonctions de pondérations par l'algorithme génétique;
- On a effectué des perturbations par variation brusque du couple de la turbine à 15% de ΔT_m à l'instant $t=0.2s$, avec variations des configurations du réseau extérieur ;
 - On a simulé les régimes de fonctionnements de la station (avec différentes configurations du réseau extérieur) suivants: nominale, sous excité et sur- excité ;
 - Notre étude a été effectuée pour différents types des générateurs synchrones puissants : TBB-200, TBB-500, BBC-720, TBB-1000 (les paramètres en annexe A).

Le tableau 3 présente Les valeurs propres des modes dominants, On présente sur le tableau 4 un exemple des résultats analytiques du comportement dynamique du SMIB par les calculs des paramètres suivants :

- α : coefficients d'amortissements;
- ε %: erreurs statiques en % ;
- d %: dépassements en % ;
- t_s : temps d'établissements.

Les courbes obtenues dans les figures 21,22 ,23 et 24 nous donnent un exemple de résultat de simulation, avec respectivement : 'Ug' La tension terminale du générateur synchrone puissant; 'Pe' La puissance électromagnétique ; 's' la variation de vitesse en terme de glissement ; 'delta' L'angle interne entre la tension et la FEM du Turbo-alternateur TBB200 avec $P= 0.85$, $X_e=0.5, Q_1= -0.107$ (pu)

Pour les détails du calculer les différents paramètres voir GUI-MATLAB qui représenté dans l'annexe A.

Tableau 3. Les valeurs propres

Les valeurs propres			
Q	λ BO	λ PSS	λ PSS-GA
-0.1372	instable	-1.6201 ± 4.3629i	-2.3283 ± 3.3747i
-0.4571	instable	-1.6503 ± 4.3582i	-2.3463 ± 3.9866i
0.1896	-0.0813 ± 7.2567i	-1.6865 ± 5.2802i	-2.3906 ± 2.9698i
0.3908	-0.1271 ± 7.9143i	-1.5379 ± 5.9476i	-2.3906 ± 2.9698i
0.5078	-0.1451 ± 8.2203i	-0.9432 ± 5.0531i	-1.9582 ± 3.2602i
0.6356	-0.1588 ± 8.5134i	-0.9283 ± 5.3747i	-1.9803 ± 3.5592i

Tableau 4. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB

Coefficients d'amortissement α							Erreur statique					
Q	BO	AVR	PSS	PSS-AG	PSS- H_{∞}	PSS- H_{∞} -AG	BO	AVR	PSS	PSS-AG	PSS- H_{∞}	PSS- H_{∞} -AG
-0.1372	instable	-0.709	-1.6201	-1.8477	-2.3283	-3.4245	instable	2.640	1.620	1.234	1.093	négligeable
-0.4571	instable	-0.708	-1.6503	-1.8320	-2.3463	-3.4325	instable	2.673	1.629	1.241	1.093	négligeable
0.1896	-0.0813	-0.791	-1.6865	-1.9918	-2.3906	-3.5328	5.038	2.269	1.487	1.267	1.084	négligeable
0.3908	-0.1271	-0.634	-1.5379	-1.9012	-2.3906	-3.6432	5.202	1.807	1.235	1.129	0.929	négligeable
0.5078	-0.1451	-0.403	-0.9432	-1.3493	-1.9582	-2.9433	3.777	0.933	0.687	0.604	0.549	négligeable
0.6356	-0.1588	-0.396	-0.9283	-1.3948	-1.9803	-2.9897	3.597	0.900	0.656	0.567	0.532	négligeable
Temps de réponse pour 5%							Dépassement en%					
Q	BO	AVR	PSS	PSS-AG	PSS- H_{∞}	PSS- H_{∞} -AG	BO	AVR	PSS	PSS-AG	PSS- H_{∞}	PSS- H_{∞} -AG
-0.1372	instable	4,231	1,704	1,349	rapide	Trèsrapide	9.572	9,053	7,892	5,237	4,354	2,765
-0.4571	instable	4,237	1,713	1,323	rapide	Trèsrapide	9,487	9,036	7,847	5,219	4,301	2,732
0.1896	-	3,793	1,617	1,408	rapide	Trèsrapide	10,959	9,447	7,314	5,928	4,354	2,854

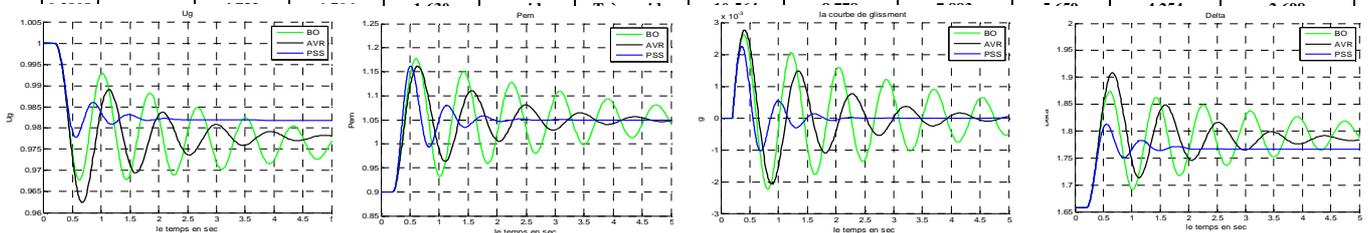


Fig.21. Fonctionnement en régime sous excité du TBB200 raccordé avec une ligne longue avec AVR, PSS et BO

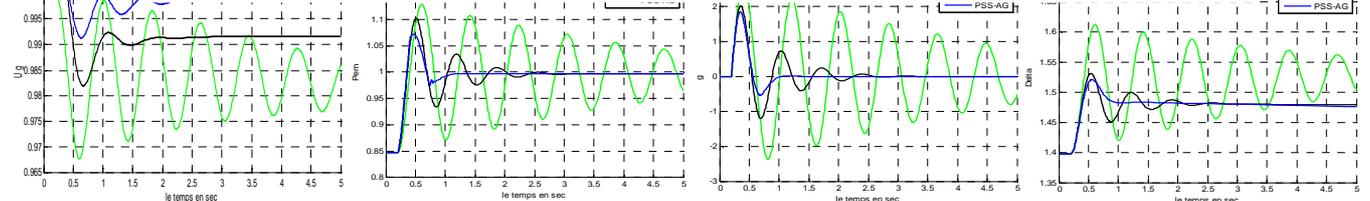


Fig.22. fonctionnement en régime sous excité du TBB200 raccordé à une ligne longue en BF avec PSS et PSS-AG

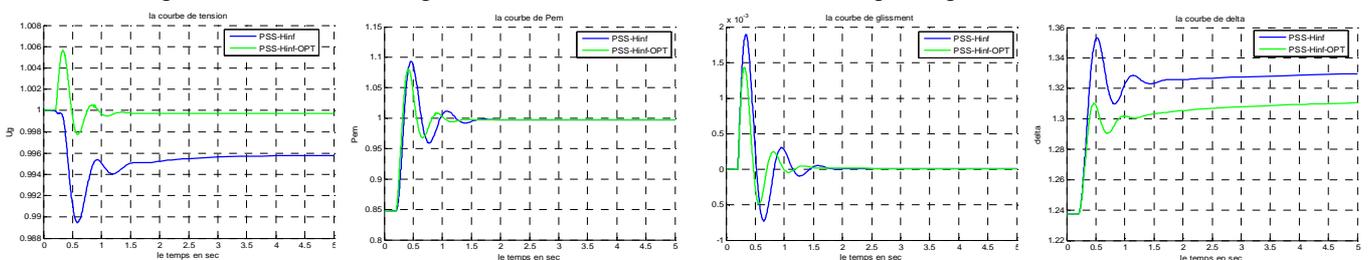


Fig.23. Fonctionnement en régime sous excité du TBB200 raccordé avec une ligne longue avec PSS- H_{∞} et PSS- H_{∞} -AG

B. Teste de Robustesse

On effectue des variations paramétriques électriques (majoration de 100% de R) à l'instant $t=4$ s. Le temps de la simulation est évalué cette fois ci à 6 secondes.

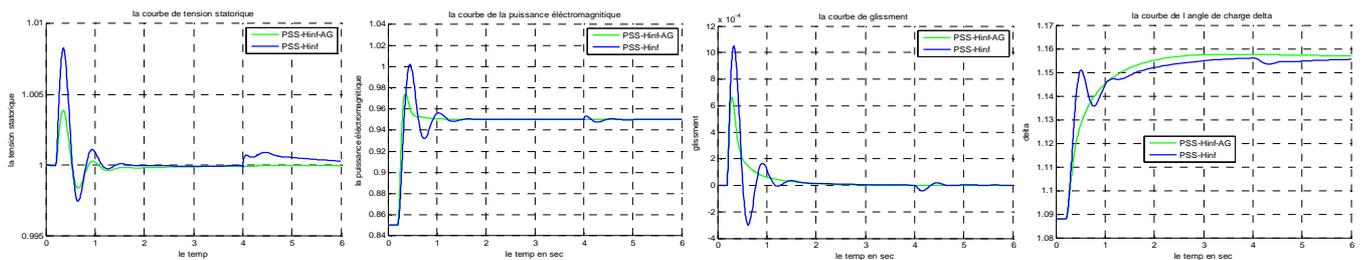


Fig. 24. Fonctionnement en régime sous excité du TBB200 raccordé avec une ligne longue avec PSS- H_{∞} et PSS- H_{∞} -AG

De l'analyse des résultats obtenus on peut constater ce qui suit:

- Le régime le plus critique qui influe sur le système est le régime sous excité (cas plus défavorable).
- Des améliorations considérables des performances dynamiques ont été obtenues avec le régulateur robuste PSS- H_∞ optimisé par AG avec une grande robustesse du système électro – énergétique.

6. Conclusion :

Dans cet article, on s'est intéressé à l'étude d'optimisation par les algorithmes génétiques (AG) des fonctions de pondérations d'un contrôleur robuste H_∞ et les paramètres de stabilisateur de puissance PSS appliqués à la régulation automatique d'excitation des générateurs synchrones puissants. Les résultats obtenus par l'application de cette technique montrent des améliorations considérables des performances dynamiques et une grande robustesse de stabilité et une adaptation du contrôleur robuste H_∞ avec des variations incertaines du système électro – énergétique.

Références

[1] 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°11-pp.21-25

[2] Demello F.P., Flannett L.N. and Undrill J.M., « Practical approach to supplementary stabilizing from accelerating power », IEEE Trans., vol. PAS-97, pp, 1515-1522, 1978.

[3] Demello F.P. and Concordia C., « Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control », IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, pp. 316–329, 1969.

[4] K. GLOVER, J.C. DOYLE, P.P. KHARGONEKAR, B.A. Francis «State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems", IEEE Trans. on A.C., 1989, vol.34, N° 8,pp.834-847.

[5] Zhou K., Doyle J.C., Glover K. "Robust and optimal control. Englewood Cliffs", NJ: Prentice Hall, 1996

[6] J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975.

[7] 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).

[8] P. KUNDUR, "Definition and Classification of power System Stability", Draft 2, 14 January,2002

[9] 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

[10] R. Asgharian "Asymptomatic approach to performance weights selection in design of robust H_∞ PSS using genetic algorithms", IEEE trans. on EC, vol 11, No 21, September 1996, pp.111-11

[11] Hong Y.Y. and Wu W.C., « A new approach using optimization for tuning parameters of power system stabilizers », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, n°. 3, pp. 780–786, Sept. 1999.

[12] 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 (Encadré par. Mr. NACERI).

[13] G. Scorletti "Introduction à la commande multivariable des systèmes : méthodes de synthèse fréquentielle H_∞ " France, 2007

[14] Allenbach J.M., Systèmes Asservis, Volume 1, Asservissements linéaires classiques, Ecole d'Ingénieurs de Genève, 2005.

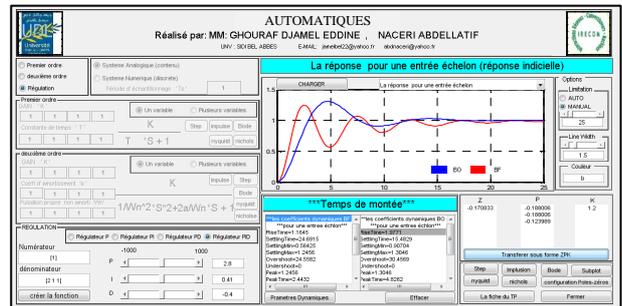
[15] Yee S.K. and Milanović J.V., « Comparison of the optimisation and linear sequential method for tuning of multiple PSSs », IEEE Power Engineering Society, General Meeting Denver, CO, June. 2004.

[16] Singh R., A Novel Approach for Tuning of Power System Stabilizer Using Genetic Algorithm, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, July 2004.

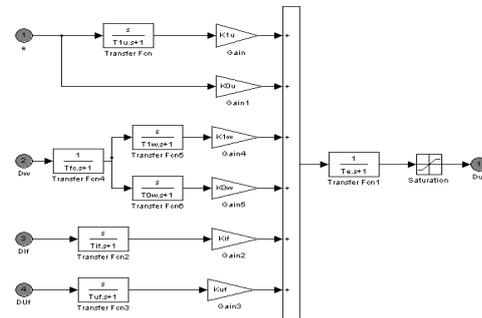
[17] Hasan ALKHATIB "étude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique" Thèse doctorat d'état, UNIVERSITE PAUL CEZANNE D'AIX-MARSEILLE, 2008.

Annexe

1.GUI –MATLAB pour calculer les paramètres dynamiques



2 .Le modèle du PSS -FA



3. Paramètre des turbo-alternateurs étudié

Paramètres	TBB-200	TBB-500	BBC-720	TBB1000	Unités de mesures
Puissance nominale	200	500	720	1000	MW
Facteur de puissance nom.	0.85	0.85	0.85	0.9	p.u.
X_d	2.56	1.869	2.67	2.35	p.u.
X_{d1}	2.56	1.5	2.535	2.24	p.u.
X_s	0.222	0.194	0.22	0.32	p.u.
X_{s1}	2.458	1.79	2.587	2.173	p.u.
X_{st}	0.12	.115	0.137	0.143	p.u.
X_{sd1}	0.0996	0.063	0.1114	0.148	p.u.
X_{st1a}	0.131	0.0407	0.944	0.263	p.u.
X_{st2a}	0.9415	0.0407	0.104	0.104	p.u.
R_s	0.0055	0.0055	0.0055	0.005	p.u.
R_t	0.000844	0.000844	0.00176	0.00132	p.u.
R_{1d}	0.0481	0.0481	0.003688	0.002	p.u.
R_{1a}	0.061	0.061	0.00277	0.023	p.u.
R_{2a}	0.115	0.115	0.00277	0.023	p.u.