

Flux optimal de puissance comprenant un contrôleur UPFC par l'algorithme génétique et l'essaim de particules

Optimal power flow including a UPFC controller by genetic algorithm and particles swarm

Ahmed Merah* & Mohamed Adjabi

Laboratoire des Systèmes Electromécaniques (LSELM), Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Info. Article	RESUME
Historique de l'article	<p>Les recherches heuristiques inspirées de la nature basée sur l'algorithme génétique (GA) et l'essaim de particules (PSO) sont présentées et utilisées pour le problème de flux optimal de puissance (OPF), dans les systèmes d'alimentation avec un contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC). Le coût total de production d'un système d'alimentation avec l'UPFC qui fixe la tension aux bus de charge est minimisé et validé de manière optimale avec l'utilisation de GA et PSO. GA, qui est basé sur la sélection naturelle et PSO, qui est basé sur le déplacement d'un groupe d'oiseaux sont des algorithmes d'optimisation proposés récemment. Les performances de GA et PSO ont été testées et vérifiées sur le système d'alimentation IEEE 30 bus en les comparant entre les deux et avec plusieurs autres méthodes d'optimisation. En outre, GA et PSO sont utilisés non seulement pour optimiser le coût total de production et les pertes de puissance active, mais aussi pour améliorer le profil de la tension du système d'alimentation. Nos résultats illustrent que GA et PSO peuvent être utilisés avec succès pour résoudre des problèmes non linéaires liés aux systèmes d'alimentation avec une préférence de la deuxième méthode</p>
<p>Reçu le 13/02/2018 Révisé le 01/01/2019 Accépté le 06/01/2019</p>	
Mots-clés	
<p>Flux de puissance, optimisation, UPFC, algorithme génétique, essais de particules.</p>	ABSTRACT
Keywords	<p>Heuristics researches inspired by nature based on genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) are presented and used for optimal power flow problem (OPF) in power systems with a unified power flow controller (UPFC). The fuel cost of producing in power system with the UPFC that sets the voltage to the load buses is minimized and validated optimally with the use of GA and PSO. GA, which is based on natural selection and PSO, which is based on moving a group of birds are recently proposed optimization algorithms. The performance of GA and PSO have been tested and verified on the IEEE 30 bus power system by comparing between them and with several other optimization methods. In addition, GA and PSO are used not only to optimize the total cost of production and active power losses, but also to improve the voltage profile of the power system. Our results illustrate that GA and PSO can be used successfully to solve non-linear problems related to power systems with a preference of the second method.</p>
<p>Power flow, optimization, UPFC, genetic algorithm, particle swarms.</p>	
* auteur correspondant :	
<p>Ahmed Merah Laboratoire des Systèmes Electromécaniques (LSELM), Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie. Email : ahmed.merah@gmail.com</p>	

1. INTRODUCTION

L'électricité joue un rôle vital dans l'économie et l'activité industrielle d'un pays, les systèmes d'énergie électrique se sont considérablement développés au cours des dernières décennies. L'électricité est générée dans les stations, transmise par les réseaux de transmission à haute tension, et livrée aux consommateurs. La demande en énergie toujours croissante, les systèmes de puissance deviennent plus complexes et difficiles à contrôler parce qu'ils sont exploités dans des conditions très stressées telles que des flux d'énergie imprévus et des pertes plus élevées [1]. Il est très difficile de faire fonctionner efficacement un système d'alimentation car le réseau moderne doit être capable de compenser la variation de demande des clients et de fournir une énergie de haute qualité. En outre, l'alimentation électrique doit surmonter le problème d'instabilité de la tension afin qu'il soit en mesure d'assurer les valeurs de tension désirées à tous les bus de charge du système [2]. Hingorani a présenté un système de transmission AC flexible (FACTS) afin de surmonter les problèmes mentionnés ci-dessus et de faire fonctionner efficacement l'équipement électrique [3]. L'amplitude de tension et l'angle de phase sur les bus sélectionnés et l'impédance des lignes de transmission peuvent être contrôlés à l'aide de dispositifs FACTS [4]. Grâce aux dispositifs FACTS, la puissance peut traverser les lignes choisies avec une augmentation considérable de la capacité de la ligne de transmission et la sécurité du système d'alimentation est améliorée [5]. Le contrôleur de flux de puissance universel (UPFC) est un dispositif FACTS bien connu qui peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne [6]. Le flux optimal de puissance (OPF) qui optimise une certaine fonction objective tout en satisfaisant les contraintes physiques, opérationnelles et de sécurité est un problème très important dans la gestion et le contrôle des systèmes d'alimentation. En général, OPF peut être défini comme un problème numérique non linéaire, multidimensionnel et à grande échelle en fonction des données de ligne et de bus [7] ; cela devient encore plus compliqué avec l'inclusion de contraintes variables et de paramètres de dispositifs UPFC. De nombreuses techniques analytiques et méthodes d'optimisation classiques ont été utilisées pour gérer la convergence vers la solution optimale approchée. En raison des inconvénients de divergence de ces méthodes classiques et du développement des techniques informatiques, l'intérêt d'utiliser des méthodes d'optimisation heuristiques pour résoudre les problèmes du système d'alimentation s'est rapidement développé au cours des dernières décennies. Les algorithmes d'optimisation heuristiques utilisent des règles de transition aléatoires avec deux objectifs contradictoires : la vitesse et la précision [8]. Les heuristiques les plus populaires telles que l'optimisation de l'essaimage de particules (PSO) [9] et l'algorithme génétique (GA) [10] ont récemment été appliquées pour minimiser le coût total de production et maintenir les tensions du bus de charge dans les limites des contraintes. Les méthodes d'optimisation classiques et les algorithmes d'optimisation heuristiques ont été utilisés avec leurs avantages et leurs limites respectifs dans les systèmes d'alimentation.

2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'UPFC

2.1. Description du circuit UPFC

L'UPFC est un des dispositifs FACTS qui contrôle indépendamment des flux de puissance actifs et réactifs, l'amplitude de tension et l'angle de phase. L'UPFC se compose de deux convertisseurs : un convertisseur série et un convertisseur shunt exploités à partir d'une liaison DC commune [11]. Les convertisseurs sont connectés au système d'alimentation via des transformateurs de couplage T_{sh} et T_{se} . La structure UPFC est décrite dans la figure 1.

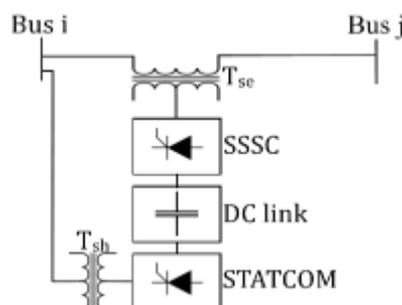


Figure 1: Schéma unifilaire d'un UPFC

Le convertisseur shunt est connecté au Bus i tandis que le convertisseur série est connecté entre Bus i et j, ce dernier injecte une tension alternative avec une amplitude et un angle de phase réglables en série avec la ligne de transmission. Lorsque la perte de puissance active est négligée, l'UPFC ne peut pas générer ou absorber la

puissance active et la puissance active dans les deux convertisseurs doit être équilibrée équation (9) via la liaison DC commune [11] [12].

2.2. Fonctionnement du circuit équivalent de l'UPFC

La figure 2 montre que les deux convertisseurs de tensions de l'UPFC peuvent être modélisés comme deux sources de tension idéales : l'une connectée en parallèle et l'autre en série entre les deux bus i et j [12].

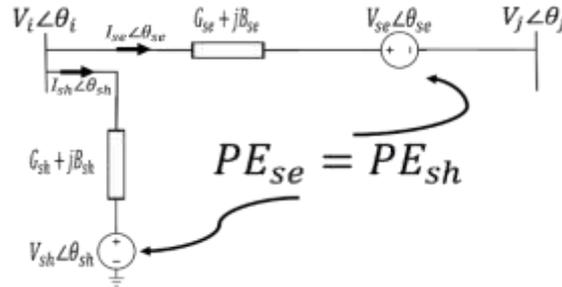


Figure 2: Schéma équivalent d'un UPFC

Les valeurs instantanées des sources de tension de l'UPFC sont :

$$V_{sh} = |V_{sh}|(\cos\theta_{sh} + \sin\theta_{sh}) \tag{1}$$

$$V_{se} = |V_{se}|(\cos\theta_{se} + \sin\theta_{se}) \tag{2}$$

L'amplitude et la phase de la source de tension représentant le contrôleur parallèle sont contrôlées entre ses limites : $V_{sh}^{min} \leq V_{sh} \leq V_{sh}^{max}$ et $0 \leq \theta_{sh} \leq 2\pi$.

La sortie de la grandeur de tension série V_{se} contrôlée entre les limites V_{se}^{min} et V_{se}^{max} et l'angle θ_{se} entre les limites 0 et 2π respectivement. Z_{sh} et Z_{se} sont considérés comme les impédances des deux transformateurs T_{sh} et T_{se}

$$G_{se} + jB_{se} = \frac{1}{Z_{se}}, G_{sh} + jB_{sh} = \frac{1}{Z_{sh}} \tag{3}$$

Le flux de puissance de la partie parallèle de l'UPFC est :

$$P_{sh} = V_i^2 G_{sh} - V_i V_{sh} (G_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) + B_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) \tag{4}$$

$$Q_{sh} = -V_i^2 B_{sh} - V_i V_{sh} (G_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh}) - B_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})) \tag{5}$$

Les puissances qui transit la ligne de transmission où l'UPFC est installé obtenues par :

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) - V_i V_{se} \left(\begin{matrix} G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se}) \\ + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_{se}) \end{matrix} \right) \tag{6}$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) - V_i V_{se} \left(\begin{matrix} G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_{se}) \\ - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se}) \end{matrix} \right) \tag{7}$$

$$\text{Où : } G_{ij} + jB_{ij} = 1/Z_{ij} \text{ Et } \theta_i - \theta_j = \theta_{ij} \tag{8}$$

L'échange de puissance active entre deux contrôleurs via la liaison DC commune est [13] :

$$PE_{se} - PE_{sh} = \text{Re}(V_{se} I_{se}^*) - \text{Re}(V_{sh} I_{sh}^*) = 0 \tag{9}$$

3. FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

L'OPF est une contrainte d'optimisation nécessitant la minimisation d'une fonction objective [7], qui est dans notre étude le coût total de production d'énergie :

$$F_T = \sum_{i=1}^{n_g} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{n_g} F_i(a_i + b_i(P_{Gi}) + c_i(P_{Gi}^2)) \tag{10}$$

Où P_{Gi} c'est le vecteur représentant la puissance active de la génératrice G_i en [MW]; a_i , b_i et c_i sont des coefficients du coût de G_i .

3.1. Contraintes d'égalité

La production d'électricité totale doit couvrir la demande totale et la perte de puissance réelle dans les lignes de transport.

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi} = \sum_{i=1}^n P_D + \sum_{i=1}^{n_l} P_L \quad (11)$$

Il est à noter que : P_D , P_L sont la puissance demandée, la perte dans les branches respectivement.

n_g , n , n_l sont respectivement le nombre des génératrices, le nombre des bus, et le nombre des branches.

3.2. Contraintes d'inégalité

Pour un fonctionnement stable, la sortie du générateur est limitée par les limites inférieure et supérieure :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (12)$$

3.3. Contraintes de sécurité

Les grandeurs de tension de bus et la charge de ligne de transmission sont limitées par les limites inférieure et supérieure comme suit :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (13)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \quad (14)$$

4. PROCESSUS D'OPTIMISATION

4.1. Algorithme génétique

GA est initialisé avec une population d'individus et une représentation binaire des variables de décision, pour effectuer la recherche en utilisant des opérateurs génétiques, c'est-à-dire la sélection, le croisement, la mutation. La qualité d'un individu est évaluée par sa forme physique, qui est basée sur la fonction de fitness. L'organigramme de GA est montré sur la figure 3.

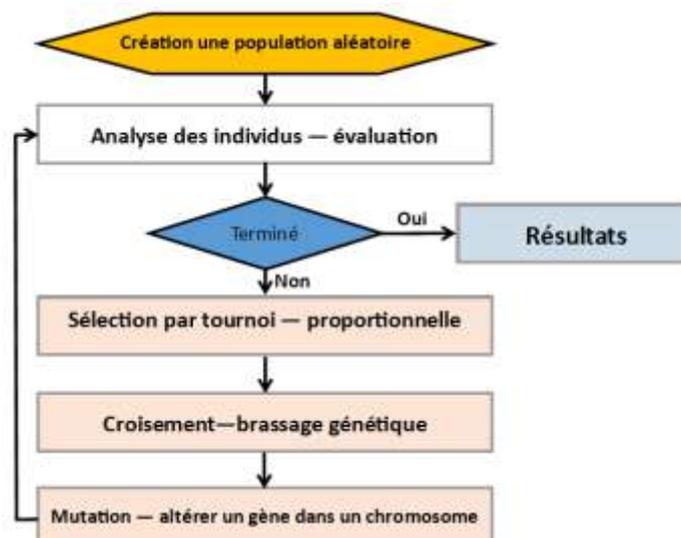


Figure 3 : Organigramme de fonctionnement de GA

Dans le cas du UPFC, cette aptitude est évaluée en fonction de la minimisation des coûts totaux de carburant de production afin de réduire les investissements et les coûts opérationnels et de fournir une puissance optimale [14]. Les opérateurs GA sont appliqués pour la prochaine génération afin d'avoir de nouveaux et

meilleurs individus. Ce processus est poursuivi jusqu'à l'obtention d'une minimisation de la fonction trouvée [15].

4.2. Optimisation par l'essaim de particules

PSO est initialisé avec un groupe de particules aléatoires qui recherche des optima en mettant à jour les générations [16]. Chaque particule dans PSO change sa position avec le temps et se déplace vers la position optimale. Une autre caractéristique de la méthode PSO est appelée swarm. Un essaim comprend un ensemble de particules voisines de la particule et de ses expériences précédentes. Chaque particule dans PSO prend sa décision en utilisant sa propre expérience et les expériences de son voisin pour l'évolution. C'est-à-dire que les particules s'approchent de l'optimum grâce à sa vitesse actuelle, à son expérience précédente et à la meilleure expérience de ses voisins [15] [16]. L'organigramme de PSO est montré sur la figure 4.

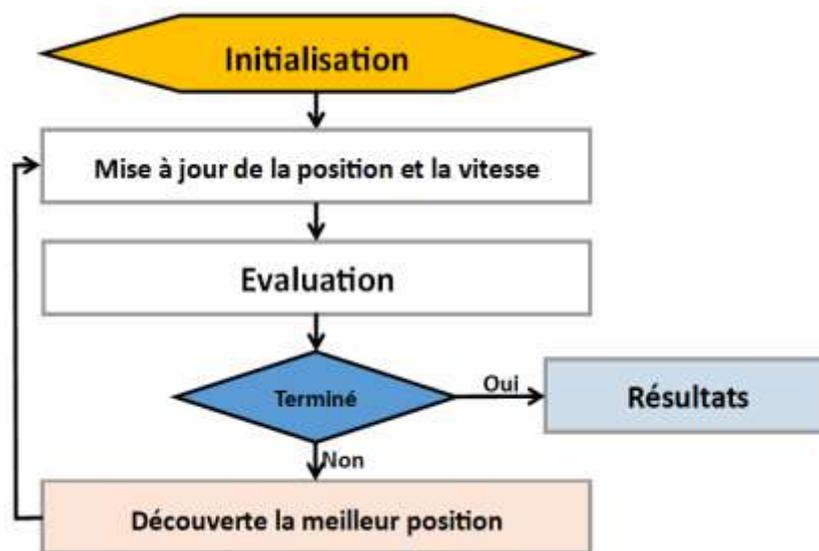


Figure 4: Organigramme de fonctionnement de PSO

Le codage du PSO est facile que GA et possède très peu de paramètres à ajuster. PSO et GA peuvent obtenir des solutions de haute qualité dans des délais plus courts, mais les principaux avantages de PSO sont des caractéristiques de convergence stables, moins sensibles à la nature de l'objective fonction, plus rapides que GA [17].

5. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette section, les simulations ont été effectuées sur un ordinateur LIFEBOOK A555 de FUJITSU dans l'environnement MATLAB R2017a, pour montrer les capacités du modèle UPFC, 3 cases ont été étudiés à l'aide d'un système IEEE 30 bus [18] :

Case 0 : ceci est le système de base IEEE 30 bus sans UPFC.

Case 1 : dans ce cas, L'UPFC est installé sur la ligne 27-30 en mode contrôle la tension de Bus 30 où la tension de référence est $V_{30}^{réf} = 1.05 [p.u]$

Case 2 : l'UPFC est installé sur la ligne 29-30 en mode contrôle la tension de Bus 30 où la tension de référence est $V_{30}^{réf} = 1.05 [p.u]$

Pour toutes les cases les rapports de transformateurs T_{11} , T_{12} , T_{15} et T_{36} sont égaux à 0.9618. Pour montrer les performances de GA et PSO, la solution de l'OPF est proposée par les deux algorithmes à l'aide de méthode

de Newton – Raphson (NR). Dix tests ont été effectués pour chaque case examinée. Le tableau 1.représente les meilleurs résultats.

Tableau 1 : Comparaison des résultats pour le système IEEE 30 bus

	ACO [19]	LP [20]	GA			PSO		
			Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2
P _{G1} [MW]	177.863	175.25	180.24	176.39	177.18	176.70	176.43	176.38
P _{G2} [MW]	43.836	48.34	45.85	48.69	47.64	48.82	48.747	48.75
P _{G5} [MW]	20.893	21.21	21.24	21.24	22.22	21.50	21.42	21.42
P _{G8} [MW]	23.123	23.60	22.0142	21.11	22.55	21.61	21.58	21.54
P _{G11} [MW]	14.025	12.25	11.19	12.61	10.50	12.09	11.99	12.07
P _{G13} [MW]	13.119	12.33	12.32	12.13	12.03	12	12	12
Coût [\$ / h]	803.123	803.08	801.95	799.86	799.94	801.71	799.84	799.81
Pertes de puissance [MW]			9.47	9.29	9.25	9.33	9.29	9.28

Les résultats de convergence sont donnés dans les figures 5 et 6. Le profil de tension obtenu pour les différents scénarios est présenté dans les figures 7 et 8.

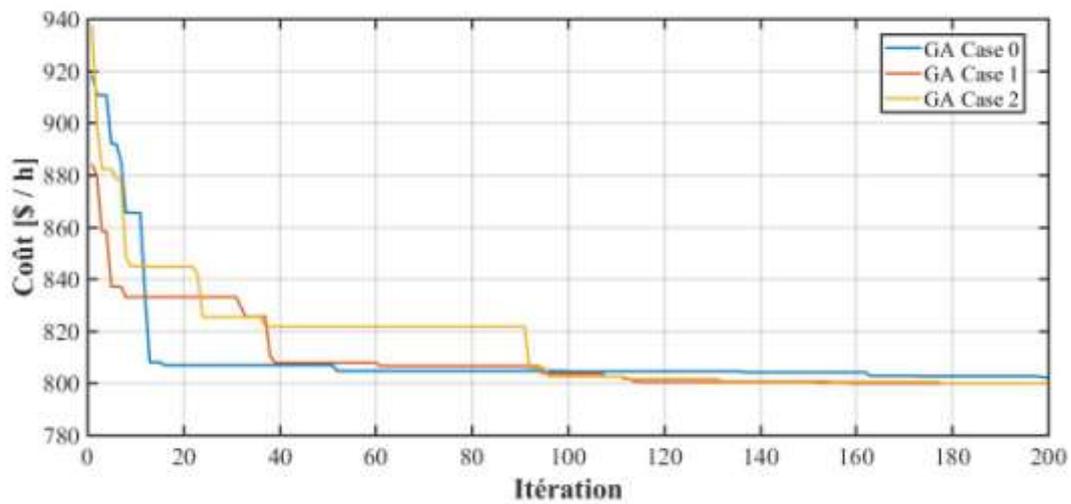


Figure 5 : Convergence de la méthode GA sur le système IEEE 30 bus

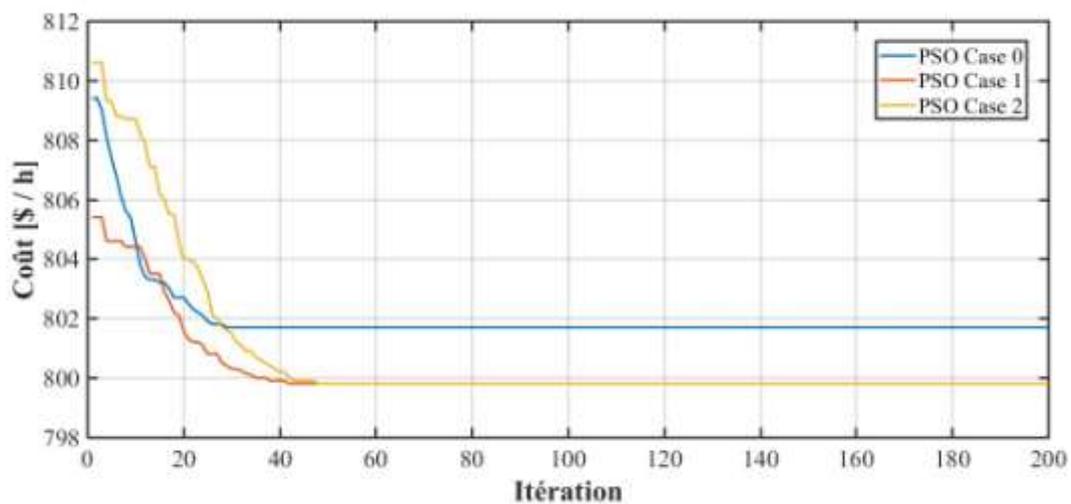


Figure 6 : Convergence de la méthode PSO sur le système IEEE 30 bus

La fonction objective est minimisée dans les cases 1 et 2 où l'UPFC est installé par rapport à la case 0 et ceci est montré dans les figures 5 et 6 et validé par les deux méthodes où l'UPFC est capable de fixer la tension au bus 30 à 1.05 [pu] (Fig. 7 et Fig.8). Il existe également une diminution de la perte de puissance dans les cases 1 et 2 où l'UPFC est installé par rapport à la case 0, qui est due aux avantages de ce contrôleur en améliorant le flux de puissance et le profil de tension ce qui provoque une légère diminution des pertes comme le montre aussi le tableau 1. La diminution des pertes de puissance est directement proportionnelle à la réduction de la puissance générée et ce qui réduit ainsi le coût total. La comparaison des deux méthodes GA et PSO montre une préférence de PSO dans les cases 0 et 1.

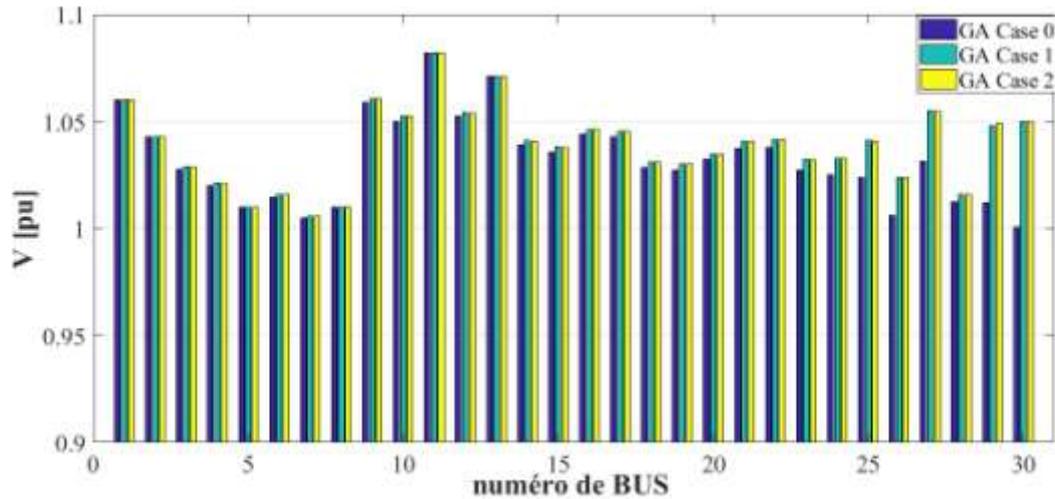


Figure 7 : Profil de tension obtenu par GA du système IEEE 30 bus

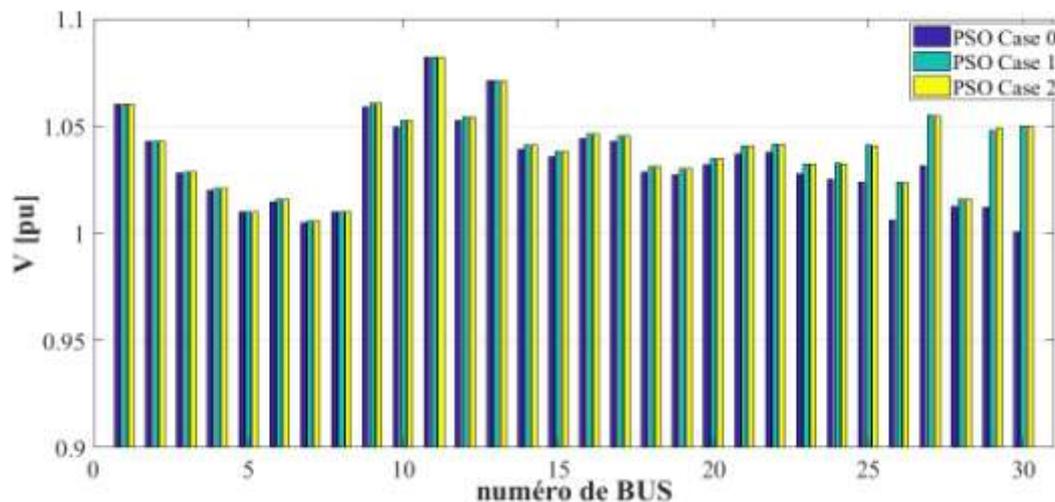


Figure 8 : Profil de tension obtenu par PSO du système IEEE 30 bus

Les cycles de convergence des solutions OPF basés sur GA et PSO pour le système IEEE 30 bus ont également été étudiés. Les résultats sont donnés dans les figures 5 et 6. Ils montrent que PSO converge en 31 itérations dans la case 0, 38 itérations dans la case 1 et 56 itérations dans la case 2, alors que GA converge dans 199, 159 et 197 itérations dans les cases 0, 1 et 2 respectivement pour obtenir la meilleure solution.

6. CONCLUSION

Ce travail présente une étude des algorithmes d'optimisation GA et PSO dans le but de fixer la tension et de minimiser les coûts totaux de carburant du générateur dans le contrôle OPF d'un système d'alimentation comprenant un contrôleur UPFC. Les approches proposées basées sur GA et PSO ont été testées sur un système de test IEEE 30 bus. En utilisant le contrôleur UPFC, la valeur de l'amplitude de tension du bus critique a été fixée à 1.05 pu. Les performances réalisées ont été évaluées en les comparant à celles d'autres méthodes d'optimisation heuristiques et classiques rapportées dans la littérature. GA et PSO peuvent être utilisés efficacement pour résoudre les problèmes non linéaires difficiles des systèmes de puissance en raison de leur supériorité et de leur convergence rapide dans un court temps d'exécution. Il est à noter que PSO a fourni les meilleurs résultats dans un quart d'itération par rapport à GA.

REFERENCES

- [1] S.B.D. Saiah, S. & A.B. Stambouli, 2017. Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: Towards high electricity generation security in 2062. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 26-43.
- [2] F.H. Gandoman et al., 2018. Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 502-514.
- [3] C.M. Huang and Y.C. Huang, 2014. Hybrid optimisation method for optimal power flow using flexible AC transmission system devices. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(12), pp.2036-2045.
- [4] S. Kamel et al., 2015. Comparison of various UPFC models for power flow control. *Electric Power Systems Research*, 121, pp.243-251.
- [5] R.P. Singh et al., 2015. Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for optimal power flow problem with FACTS devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, pp.1185-1196.
- [6] P. Song et al., 2017, October. Voltage sensitivity analysis based bus voltage regulation in transmission systems with UPFC series converter. In *Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE* (pp. 483-488). IEEE.
- [7] J. Zhu, 2015. Optimization of power system operation (Vol. 47). John Wiley & Sons.
- [8] H. Zhou, 2018. A comparative study of improved GA and PSO in solving multiple traveling salesmen problem. *Applied Soft Computing*, 64, pp.564-580.
- [9] J. Sun et al., 2014. Solving the power economic dispatch problem with generator constraints by random drift particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), pp.222-232.
- [10] Q. Zhu and A.T. Azar, eds., 2015. Complex system modelling and control through intelligent soft computations. Germany: Springer.
- [11] F.M. Albatsh et al., 2017. Fuzzy logic based UPFC and laboratory prototype validation for dynamic power flow control in transmission lines. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 64, pp.9538-9548.
- [12] G. Kenne et al., 2017. A New Hybrid UPFC Controller for Power Flow Control and Voltage Regulation Based on RBF Neurosliding Mode Technique. *Advances in Electrical Engineering*.
- [13] X.P. Zhang et al., 2012. Flexible AC transmission systems: modelling and control. Springer Science & Business Media.
- [14] M.M. Bhaskar and S. Maheswarapu, 2013. A hybrid genetic algorithm approach for optimal power flow. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 9(2), pp.211-216.
- [15] S. Kumar and D.K. Chaturvedi, 2013. Optimal power flow solution using fuzzy evolutionary and swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 47, pp.416-423.
- [16] P. Kumar and R. Pukale, 2015. Optimal Power Flow Using PSO. *Computational Intelligence in Data Mining, Springer New Delhi*. Volume 1, pp. 109-121.
- [17] S. Chaturvedi et al., 2015, September. Comparative analysis of particle swarm optimization, genetic algorithm and krill herd algorithm. In *Computer, Communication and Control (IC4), 2015 International Conference on IEEE*, pp. 1-7.
- [18] Pg_tca30bus, URL https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm (accessed 12.12.17).
- [19] B. Allaoua and A. Laoufi, 2009. Optimal power flow solution using ant manners for electrical network. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 9(1), pp.34-40.
- [20] S. Sayah et al., 2006. A successive linear programming based method for solving the optimal power flow problem. In *Proceedings of the first international meeting on Electronics & Electrical Science and Engineering, IMESE* (Vol. 6, pp. 4-6).

ANNEXES

Les données du réseau IEEE 30 bus et l'UPFC sont regroupés dans les annexes suivantes:

Annexe 1 : Paramètres de l'UPFC

Nombre de l'UPFC	1
S_{UPFC}	± 12 MVA
X_{sh}	0.01+j0.1 [pu]
X_{se}	0.01+j0.1 [pu]

Annexe 2 : Coefficients de coût et limites de chaque génératrice du réseau IEEE 30 bus

G_i	les coefficients			Min	Max
	a	b	C	[MW]	[MW]
G_1	0,00375	2.00	0	50	200
G_2	0,01750	1,75	0	20	80
G_5	0,06250	1.00	0	15	50
G_8	0,00830	3,25	0	10	35
G_{11}	0,02500	3.00	0	10	30
G_{13}	0,02500	3.00	0	12	40

Annexe 3 : Limites de tension pour les différents nœuds

Nœuds	type de nœud	V_i^{min}	V_i^{max}
1	Slack	0.90	1.10
2, 5, 8, 11, 13	PV	0.90	1.10
3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	PQ	0.94	1.06

Annexe 4 : Limites de flux de puissances en MVA dans les branches

les branches l_i	S_{li}^{max}
1, 2, 4, 5, 9	130
7	90
8	70
3, 6, 11, 13, 14, 15, 16, 36	65
10, 12, 17, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 40, 41	32
20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39.	16