

IMPACT DE LA GENERATION DISTRIBUÉE SUR LA COORDINATION DES RELAIS DIRECTIONNELS A MAXIMUM DE COURANT

Khaled GUERRAICHE¹, Feriel MIDOUNI², Nour Elhouda SAHRAOUI³, Latifa DEKHICI^{1,4}

In this paper, a new algorithm, balance optimizer (EO), based on the physical mass balance equation, is implemented to solve the problem of optimal coordination of directional overcurrent relays (DOCR) in microgrids with the presence of the distributed generation. In this paper, a new algorithm, Equilibrium Optimizer (EO), which is based on the physical equation of the mass balance, is implemented to solve the problem of the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays (DOCRs). Moreover, the proposed method uses linear programming (LP) and mixed-integer nonlinear programming (MINLP) in order to optimize the time dial setting (TDS), as well as the plug setting (PS), satisfying all possible constraints. Additionally, the performance of algorithm is evaluated with and without distributed generation. The results obtained show the efficiency and the robustness of the proposed method compared to the (TLBO) algorithm performances under the same conditions aimed at fair comparisons.

Dans cet article, un nouvel algorithme, optimiseur d'équilibre (EO), basé sur l'équation physique du bilan de masse, est implémenté pour résoudre le problème de la coordination optimale des relais directionnels de surintensité (DOCR) dans les micro-réseaux avec la génération distribuée. De plus, la méthode proposée utilise la programmation non linéaire (NLP), afin d'optimiser le réglage du cadran temporel (TDS), ainsi que le réglage de prise (PS), en satisfaisant toutes les contraintes possibles. De plus, les performances de l'algorithme sont évaluées avec et sans génération distribuée. Les résultats obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de la méthode proposée par rapport aux performances de l'algorithme (TLBO) dans les mêmes conditions visant à des comparaisons équitables.

Mots clés : Optimiseur d'équilibre, Coordination optimale, Relais à maximum de courant, Génération distribuée.

¹ Laboratoire LDREI, Dépt.de Génie Electrique, Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique d'Oran, Algérie, e-mail: khguerraiche@yahoo.fr

² Dépt.de Génie Electrique, Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique d'Oran, Algérie, e-mail: ferielmidouni9@gmail.com

³ Dépt.de Génie Electrique, Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique d'Oran, Algérie, E-mail: Sahraoui.nour292@gmail.com

⁴ Dépt. d'informatique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, e-mail: Latifa.dekhici@univ-usto.dz

1. Introduction

Les ingénieurs électrotechniciens tentent depuis des décennies d'améliorer la conception de la protection en utilisant de nouvelles techniques. Ainsi, avoir un plan de protection satisfaisant, nécessite d'optimiser le temps de fonctionnement des relais directionnels [1]. Dans les lignes de distribution, les relais de surintensité sont utilisés comme protection primaire, tandis que dans les lignes de transmission, ils sont utilisés comme protection secondaire. La coordination efficace de ces deux éléments assure le bon fonctionnement de la partie saine du réseau lors de l'apparition d'éventuels défauts. [2]. Lorsqu'un défaut se produit, le réseau en question sera protégé par les relais primaires [3], qui doivent fonctionner pour éliminer le défaut et isoler la zone affectée, sinon ce sont les relais secondaires qui agiront après un intervalle de temps spécifié nommé CTI [2, 4]. De plus, pour assurer la fiabilité et la sécurité de la transmission et de l'interconnexion des réseaux électriques, les relais à courant maximum doivent être équipés d'une fonctionnalité directionnelle. Le temps de fonctionnement (OT) du relais directionnel à courant maximum est déterminé par deux variables de conception : TDS (réglage du cadran temporel) et IP (courant de seuil) ou PS (réglage de la prise) [5].

L'optimisation de la coordination des relais à courant maximum peut être modélisée selon trois formulations. La première est la programmation linéaire (LP), où le TDS est la seule variable à optimiser tout en gardant la valeur PS constante, et nécessite donc des valeurs PS initiales. La seconde est la programmation continue non linéaire ou mixte en nombres entiers (MINLP), où les variables sont TDS et PS à optimiser. La troisième formulation, qui est la programmation non linéaire (NLP), où les variables de conception sont TDS et IP, cette dernière prenant des valeurs continues, cette dernière est utilisée dans ce papier. La différence entre les deux formulations est que PS prend des valeurs continues dans (NPL), tandis que PS prend des valeurs discrètes dans (MINLP) [5].

Plusieurs techniques sont utilisées pour résoudre le problème de la coordination optimale des DOCR. Parmi ces techniques figurent les méthodes méta-heuristiques, qui sont bio-inspirées par la nature. Parmi ces méthodes, nous citons, l'optimisation de Harris Hawks et l'algorithme Jaya hybrident avec les formulations LP, NLP et MINLP [5]. L'hybridation de l'algorithme de biogéographie avec la programmation linéaire (BBO-LP) est utilisée dans [6]. L'algorithme du cycle de l'eau (WCA) est proposé par [7]. L'algorithme Firefly (FA) dans [8, 9]. L'hybridation des colonies d'abeilles artificielles (ABC) et l'optimisation des essaims de particules (PSO) ont été mises en œuvre par [10]. L'algorithme de chercheurs (SOA) a été utilisé dans [11]. L'algorithme génétique (GA) en hybridation avec (NLP) a été utilisé par [12]. Optimiseur de loup gris

(GWO) et Optimiseur de loup gris amélioré (EGWO) sont utilisés dans [13]. L'algorithme du champ électromagnétique (EFO) et sa version modifiée (MEFO) ont été utilisés dans [14]. L'algorithme d'évolution différentielle adaptative (ADE) et l'algorithme d'évolution différentielle adaptative modifié (MADE) dans [15] et [16], respectivement. L'algorithme de recherche d'harmonie (HAS) par [17]. L'algorithme de gradient (GBO) a été utilisé dans [18]. L'algorithme de compétition impérialiste dans [19]. L'algorithme de recherche de coucou (CSA). L'algorithme de lucioles (FFA) et l'hybride CSA-FFA ont été utilisés dans [20]. Toutes ces méthodes ont été utilisées pour résoudre le problème de la coordination des surintensités.

Dans cet article, l'algorithme optimiseur d'équilibre (OE), est utilisé pour être comparé à l'algorithme (TLBO) cité dans la littérature, en présence de la génération distribuée en utilisant plusieurs topologies. Bien que l'algorithme OE ait été introduit par Afshin Faramarzi en 2020 [21], il n'a toujours pas encore été appliqué dans le domaine de la coordination optimale des relais à courant maximum.

Les points suivants résument les contributions de cet article comme suit :

- L'algorithme OE, est utilisé pour résoudre le problème de coordination optimale des relais DOCR.
- L'hybridation de OE avec les formulations NLP est appliquée pour améliorer la vitesse de convergence en réduisant le nombre d'itérations requis et le temps de calcul.
- L'algorithme OE, est testé sur des systèmes de test à 3 bus avec et sans GD, et les problèmes sont résolus avec succès.

Ce document est organisé comme suit :

La section II présente la formulation du problème de coordination directionnelle. La description de la méthode d'optimisation utilisée est présentée dans la section III. Les résultats numériques de la simulation sont illustrés dans la section IV. Enfin, une conclusion et des perspectives sont présentées dans la section V.

2. Formulation du problème

L'objectif principal de la coordination des relais directionnels à maximum de courant, est d'assurer la sécurité et la fiabilité du système d'alimentation électrique [15]. Ceci est réalisé en déterminant les réglages optimaux du relais qui correspondent à la fonction objective minimale, de tout en préservant le bon fonctionnement du système de protection. En d'autres termes, les relais primaires doivent d'abord éliminer le défaut qui se produit dans la zone protégée sinon, les relais de secours doivent fonctionner pour ouvrir le circuit après un temps de coordination prédéfini en cas de défaillance des relais primaires.

2.1. Fonction objective

La fonction objective peut être définie comme suit [12] :

$$OF = \sum_{i=1}^n OT_i \quad (1)$$

OT_i est le temps de fonctionnement primaire du $i^{\text{ème}}$ relais, n est le nombre de relais, le temps de fonctionnement peut être défini comme suit [22] :

$$OT_i = \frac{a}{PSM^b - 1} TDS_i \quad (2)$$

Avec : a , b et c sont des paramètres constants liés aux caractéristiques des relais.

$$PSM = \frac{I_F}{I_{Pu}} \quad (3)$$

Avec:

IF : Courant de défaut.

IPu : Courant de démarrage.

2.2. Contraintes

- Bornes du TDS

$$TDS_{imin} \leq TDS_i \leq TDS_{imax} \quad (4)$$

TDS_{min} et TDS_{max} : le réglage du cadran de temps minimal et maximal respectivement.

- Bornes du PS

$$PS_{imin} \leq PS_i \leq PS_{imax} \quad (5)$$

PS_{min} et PS_{max} sont le réglage minimal et maximal de la prise du relais.

- Bornes du OT

$$OT_{imin} \leq OT_i \leq OT_{imax} \quad (6)$$

OT_{min} et OT_{max} sont les limites du temps de fonctionnement du relais.

- Contrainte de coordination

$$OT_s - OT_p \geq CTI \quad (7)$$

Avec : OT_s : Temps de fonctionnement principal.

OT_p : Temps de fonctionnement de secours.

CTI : Intervalle de temps de coordination.

- Constantes du relais

Les constantes a, b et c indiquées dans l'équation (2) sont liées au type de relais utilisé, comme indiqué dans le Tableau 1.

Table 1

Constantes de la caractéristique du relais [23]

Caractéristiques du relais	a	b
Inverse standard	0.14	0.02
Très inversé	13.50	1.00
Extrêmement inverse	80.00	2.00

La courbe caractéristique IDMT inverse standard, est utilisée dans cette étude.

2.3. Pénalité et violation des contraintes

Les solutions peuvent avoir un temps de déclenchement incorrecte. Dans ce cas, un terme de pénalité est inclus dans la fonction objective pour s'assurer que le temps de déclenchement du relais est supérieur ou égal à une certaine valeur OT_{min} [20], et pour éviter toute violation des contraintes de coordination.

$$OF = \sum_{i=1}^n OT_i^p + \sum_{k=1}^m \text{Penalty}(k) \quad (8)$$

Avec : n : nombre de relais.

m : nombre de paires de relais (P/S).

La pénalité (k) s'exprime comme suit :

$$\text{Penalty} = \begin{cases} \xi |CTI - \Delta_k| & \text{si } \Delta_k \leq CTI \\ 0 & \text{si } \Delta_k \geq CTI \end{cases} \quad (9)$$

Où, $\Delta T_k = T_k^{\text{backup}} - T_k^{\text{primary}}$ est le facteur de pénalité [17], le terme de pénalité est utilisé dans cette étude pour obtenir de meilleurs résultats.

3. Algorithme optimiseur d'équilibre

L'optimiseur d'équilibre (OE), est l'un des récents algorithmes d'optimisation, inspiré de l'équation du bilan de masse physique. Il décrit l'équilibre et les états dynamiques des modèles de bilan de masse. De plus, du fait de ses hautes propriétés d'exploration, l'algorithme OE a l'avantage de pouvoir changer de solution au hasard. Les particules et les concentrations dans OE qui indiquent les agents de recherche sont identiques aux particules et aux positions dans l'optimisation par Essaims Particules (PSO). Pour atteindre l'état d'équilibre (résultat optimal), les agents de recherche mettent à jour de manière aléatoire leur

concentration par rapport aux meilleures solutions trouvées, à savoir les candidats à l'équilibre [24,25]. Le détail de cette méthode, est décrit ci-dessous.

3.1. Initialisation

Semblable à de nombreux autres algorithmes métaheuristiques, l'algorithme OE nécessite la création d'une population initiale. Les limites inférieure et supérieure doivent être définies pour permettre à la population de rechercher dans les limites spécifiées qu'elle a créées comme ci-dessous [21, 26] :

$$C_i^d = C_{\min} + \text{rand}_i^d(C_{\max} - C_{\min}), i = 1, 2, \dots, D \quad (10)$$

Avec : C : Position de la particule.

i : Nombre de particules.

D : Nombre de dimensions.

C_{\max} et C_{\min} : Valeurs maximale et minimale des dimensions.

rand : Vecteur aléatoire entre $[0, 1]$.

Ensuite, la population sera évaluée avec la fonction de fitness pour identifier les 4 meilleures solutions jusqu'à présent.

3.2. Equilibre de la balance

Les quatre meilleures particules précédentes jusqu'à présent et leur moyenne sont utilisées pour construire l'équilibre comme suit :

$$C_{eq,pool} = \{C_{eq(1)}, C_{eq(2)}, C_{eq(3)}, C_{eq(4)}, C_{eq(ave)}\} \quad (11)$$

Ces cinq candidats prometteurs stockés dans le pool d'équilibre sont utilisés pour mettre à jour la position des particules à chaque itération par une sélection aléatoire dans la balance d'équilibre, voir la figure 1.

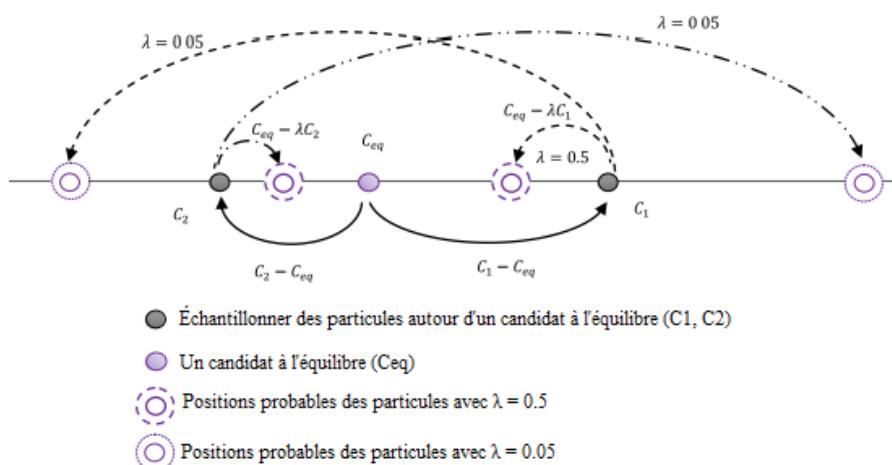


Fig. 1. Présentation 1-D des concentrations mettant à jour l'aide à l'exploration et à exploitation [21].

3.3. Terme exponentiel

Le terme exponentiel, est le facteur qui aide OE à maintenir un équilibre possible. Il est défini comme suit :

$$F = \exp(-\lambda(t - t_0)) \quad (12)$$

λ : vecteur aléatoire entre [0,1].

$$t = \left(1 - \frac{\text{Iter}}{\text{MaxIter}}\right)^{\alpha \frac{\text{Iter}}{\text{MaxIter}}} \quad (13)$$

Avec : Iter : Itération courante.

MaxIter : Nombre maximal d'itérations.

α : Constante utilisée pour contrôler l'exploitation.

t_0 : Paramètre utilisé pour contrôler l'exploitation.

$$t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln(-\beta \text{sign}(r - 0.5) [1 - \exp(-\lambda t)]) + t \quad (14)$$

Avec : r : Vecteur aléatoire entre [0, 1].

β : Constante utilisée pour contrôler la capacité d'exploration, lorsque β est plus élevé, l'augmentation de l'exploration, α , β sont choisis pour être 1 et 2 respectivement.

En remplaçant l'équation (14) dans l'équation (12), le terme exponentiel final obtenu est :

$$F = \beta \text{sign}(r - 0.5) \exp(-\lambda t) - 1 \quad (15)$$

La figure 2, montre également l'organigramme de l'optimiseur d'équilibre.

3.4. Taux de génération

Le taux de génération est l'un des principaux facteurs de l'algorithme OE, cela aide à améliorer la fonction d'exploration de l'algorithme OE. Il est formulé comme suit :

$$G = G_0 \exp(-\lambda(t - t_0)) = G_0 F \quad (16)$$

$$G_0 = GCP(C_{eq} - \lambda C) \quad (17)$$

$$GCP = \begin{cases} 0.5r_1 & \text{if } r_2 \geq GP \\ 0 & \text{if } r_2 \leq GP \end{cases} \quad (18)$$

Avec : r_1, r_2 : Deux vecteurs aléatoires entre [0, 1].

GCP : Paramètre de contrôle du taux de génération.

La règle de mise à jour de l'algorithme OE, est définie comme suit :

$$C = C_{eq} + (C - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V}(1 - F) \quad (19)$$

Initialisé les particules de la populations i=1,...,D

Attribuer un candidat à l'équilibre

Attribution libre des paramètres β = 2; α = 1; GP = 0.5;

Tant que < Max_iter

Pour i=1: nombre de particules (D)

Calculer la fonction objective du ième particule

Si fit(̄C_i) < fit(̄C_{eq,1})

Replace ̄C_{eq,1} Avec ̄C_i et fit(̄C_{eq,1}) Avec fit(̄C_i)

Sinon si fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,1}) & fit(̄C_i) < fit(̄C_{eq,2})

Replace ̄C_{eq,2} Avec ̄C_i et fit(̄C_{eq,2}) Avec fit(̄C_i)

Sinon si fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,2}) & fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,3}) & fit(̄C_i) < fit(̄C_{eq,3})

Replace ̄C_{eq,3} Avec ̄C_i et fit(̄C_{eq,3}) Avec fit(̄C_i)

Sinon si fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,1}) & fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,2}) & fit(̄C_i) > fit(̄C_{eq,3}) & fit(̄C_i) < fit(̄C_{eq,4})

Replace ̄C_{eq,4} Avec ̄C_i et fit(̄C_{eq,4}) Avec fit(̄C_i)

Fin (si)

Fin (pour)

$$\vec{C}_{ave} = (\vec{C}_{eq,1} + \vec{C}_{eq,2} + \vec{C}_{eq,3} + \vec{C}_{eq,4})/4$$

$$\text{Construire l'équilibre de la balance } \vec{C}_{eq,pool} = \{ \vec{C}_{eq(1)}, \vec{C}_{eq(2)}, \vec{C}_{eq(3)}, \vec{C}_{eq(4)}, \vec{C}_{eq(ave)} \}$$

Réaliser une sauvegarde de la mémoire (if Iter > 1)

$$\text{Attribuer } t = (1 - \frac{\text{Iter}}{\text{Max_iter}})^{\alpha \frac{\text{Iter}}{\text{Max_iter}}} \quad Eq (13)$$

Pour i=1: nombre de particules (D)

Choisir au hasard un candidat de l'équilibre de balance (vecteur)

$$\text{Générer au hazard les vecteurs } \vec{\lambda}, \vec{r} \quad Eq (15)$$

$$\text{Construire } \vec{F} = \beta \text{sign}(\vec{r} - 0.5)[e^{-\vec{\lambda}t} - 1] \quad Eq (15)$$

$$\text{Construire } \vec{GCP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases} \quad Eq (18)$$

$$\text{Construire } \vec{G}_0 = \vec{GCP}(\vec{C}_{eq} - \vec{\lambda}\vec{C}) \quad Eq (17)$$

$$\text{Mise à jour de la concentrations } \vec{C} = \vec{C}_{eq} + (\vec{C} - \vec{C}_{eq}) \cdot \vec{F} + \frac{\vec{G}}{\lambda V} (1 - \vec{F}) \quad Eq (19)$$

Fin (pour)

Iter=Iter+1

Fin Tant que

Fig. 2. Pseudo code de l'optimiseur d'équilibre (OE) [21]

3.5. Sauvegarde de la mémoire

Ce mécanisme ressemble au concept P_{best} dans Essaims particules Optimisation. Si la valeur de la fonction objective, atteinte par la particule dans l'itération actuelle est meilleure que l'itération précédente, alors la particule avec la meilleure fonction objective sera enregistrée et stockée dans P_{best} [21].

4. Résultat and Discussion

Dans cette section, un réseau de 3 bus est testé avec trois cas différents : cas 1 ; sans (DG), cas 2 ; avec (SBDG) et cas 3 ; avec (IBDG) illustré dans les figures 8 et 9. Afin de déterminer l'effet du GD sur la protection, la coordination,

ainsi que les performances de la méthode proposée. Le problème est modélisé comme un problème NLP, le courant de défaut est présenté dans [27]. Les différents paramètres sont comme suit :

TDS varie de 0,05 à 1,2.

PS de 0,5 à 1.

CTI sélectionné est de 0,3s

4.1. Réseau 3 bus sans GD

Dans le premier cas, le test est effectué pour un réseau de 3 bus avec, un générateur, 5 relais et sans DG, comme le montre la figure 3. Les paramètres de l'algorithme OE, choisis pour ce test sont Pop=20, et Max_iter=120.

Les résultats (réglages optimaux) obtenus sont présentés dans le tableau 2. Il est clair que OE, pourrait atteindre une valeur optimale de 1.2496 s en respectant les contraintes, et une valeur de 1.7139 s pour TLBO, comme le montre la figure 4, qui illustre le CTI du tableau 3. Selon la figure 5, nous pouvons voir que l'OE pourrait atteindre la valeur optimale en 60 itérations.

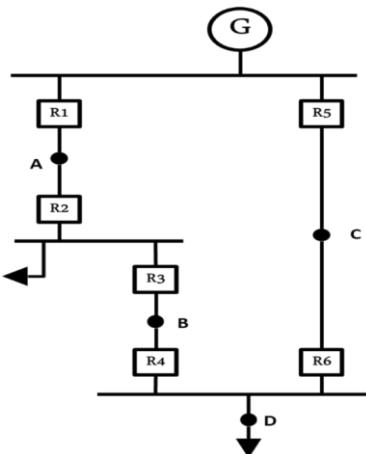


Fig.3. Réseau 3 bus sans DG

Table 2

Réglage optimal obtenu par OE sans GD

Relai N°	TLBO [27]		Méthode proposée OE	
	TDS	PS	TDS	PS
1	0.0706	0.9761	0.0854	0.5
2	0.0503	0.6001	0.0500	0.5
3	0.0500	0.6567	0.0587	0.6020
4	0.0500	0.8036	0.0872	0.5554
5	0.0744	0.9947	0.1600	0.5425
6	0.0500	0.6266	0.0560	0.5229
FO (s)	1.7139		1.2496	

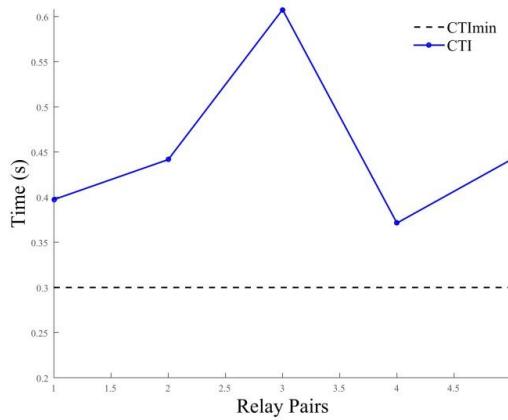


Fig. 4. Intervalle de temps de coordination pour le système à 3 bus sans GD

Table 3

Temps de fonctionnement primaire et secours obtenus par OE

Méthode proposée EO					TLBO [27]
P/R	B/R	OT _P	OT _S	CTI	CTI
2	4	0.1873	0.5846	0.3973	0.3125
3	1	0.3139	0.7556	0.4416	0.3185
4	5	0.4386	1.0460	0.6077	0.3077
6	3	0.3098	0.6810	0.3713	0.3557
3	1	0.3139	0.7556	0.4416	0.6551

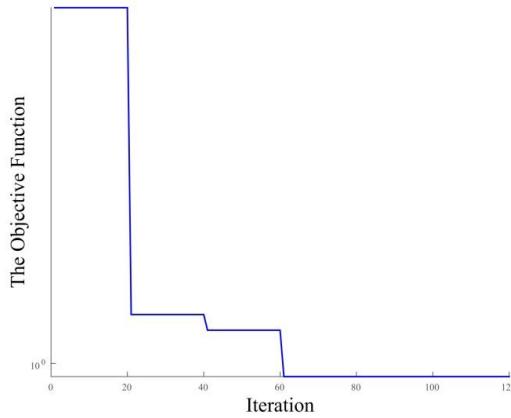


Fig. 5. Caractéristiques de convergence pour le système à 3 bus sans DG

4.2. Réseau 3 bus avec GD**a. Réseau 3 bus avec SBDG**

Pour ce cas, le test est effectué pour un réseau de 3 bus avec, un générateur, 5 relais et avec génération distribuée basé synchrone (SBDG), comme le montre la figure 6. Les paramètres de OE sont sélectionnés comme Pop=50 et

Max_iter=110. Les résultats (réglages optimaux) obtenus sont présentés dans le tableau 4.

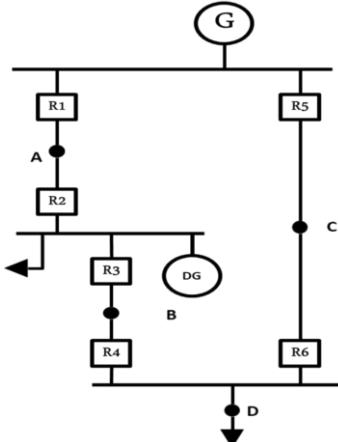


Fig.6. Réseau 3 bus avec GD

Table 4

Réglage optimal obtenu par OE avec SBDG

Relai N°	TDS	PS
1	0.1244	0.7500
2	0.0500	0.9550
3	0.0500	0.8429
4	0.0500	0.9171
5	0.3082	0.5000
6	0.0500	0.6223
FO (s) OE	1.07	
FO (s) TLBO [27]	0.9336	

Le temps obtenu par OE est de 1.07 s, et les contraintes sont respectées comme le montre le tableau 5, en comparant avec TLBO qui viole les contraintes avec des valeurs de CTI inférieure à 0.3 s (0.224s, 0.207s et 0.1877s), et avec un temps de 0.9336 s.

Table 5

Temps de fonctionnement primaire et secours obtenus par OE avec SBDG

Méthode proposée EO					TLBO [27]
P/R	B/R	OT _P	OT _S	CTI	CTI
2	4	0.2527	0.6923	0.4396	0.3557
3	1	0.2654	0.6317	0.3663	0.224
4	5	0.2947	1.1900	0.8954	0.207
6	3	0.2571	0.6596	0.4025	0.1877
3	1	0.2654	0.6317	0.3663	0.8411

La figure 7, qui illustre le CTI du tableau 5. Selon la figure 8, nous pouvons voir que l'OE avec SBDG, pourrait atteindre la valeur optimale en 100 itérations.

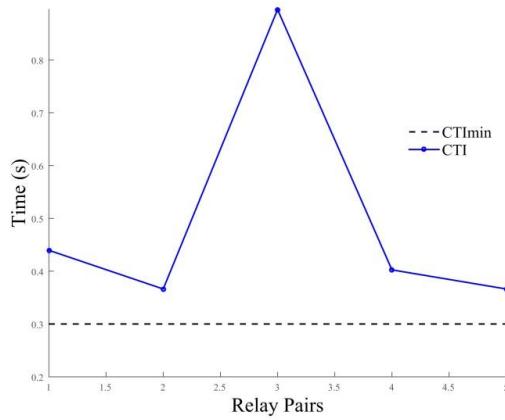


Fig. 7. Intervalle de temps de coordination pour le système à 3 bus avec SBDG

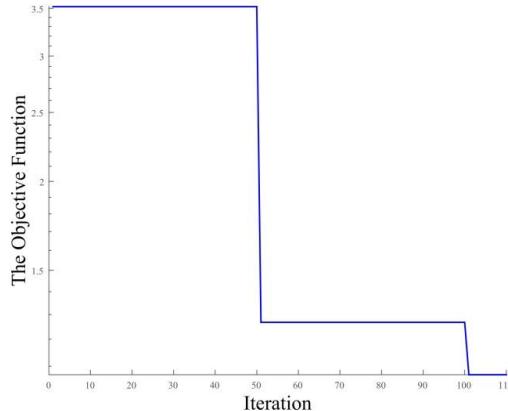


Fig. 8. Caractéristiques de convergence pour le système à 3 bus avec SBDG

b. Réseau 3 bus avec IBDG

Pour le dernier cas, le test est effectué pour un réseau de 3 bus avec, un générateur, 5 relais et avec génération distribuée basé sur l'onduleur (IBDG), comme le montre la figure 6. Les paramètres de OE, choisis pour ce système de test sont ; Pop=20 et Max_iter=110. Les résultats (réglages optimaux) obtenus sont présentés dans le tableau 6. Le temps obtenu par OE est de 1.687 s, et les contraintes sont respectées comme le montre le tableau 7, en comparant avec TLBO qui viole les contraintes avec des valeurs de CTI inférieure à 0.3 s (0.2717s), et avec un temps de 1.08 s.

Table 6

Réglage optimal obtenu par OE avec IBDG

Relai N°	TDS	PS
1	0.0590	0.9763
2	0.0500	1
3	0.1098	0.6022

4	0.1250	0.5704
5	0.2745	0.5788
6	0.0500	0.5000
FO (s) OE		1.687
FO (s) TLBO [27]		1.08

Table 7

Temps de fonctionnement primaire et secours obtenus par OE avec IBDG

P/R	B/R	Méthode proposée EO			CTI
		OT _P	OT _S	CTI	
2	4	0.2807	0.8935	0.6128	0.3259
3	1	0.5814	1.0610	0.4798	0.986
4	5	0.5874	1.3230	0.7361	0.2717
6	3	0.2377	1.2240	0.9864	0.3658
3	1	0.5814	1.0610	0.4798	0.984

La figure 9, montre le CTI du tableau 7. Selon la figure 10, nous pouvons voir que l'OE avec SBDG, pourrait atteindre la valeur optimale en 100 itérations.

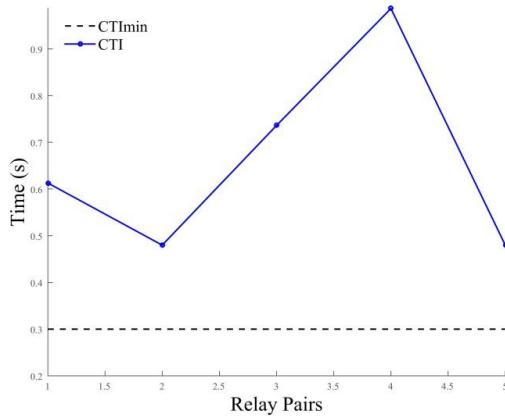


Fig. 9. Intervalle de temps de coordination pour le système à 3 bus avec IBDG

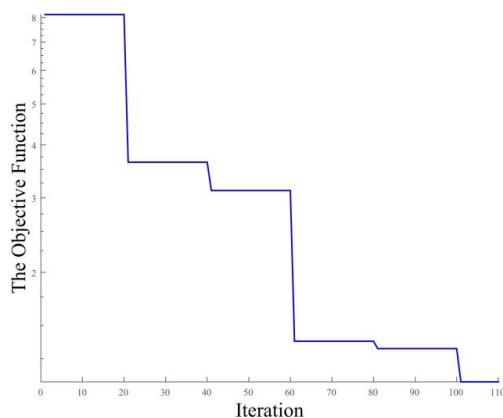


Fig. 10. Les caractéristiques de convergence pour le système à 3 bus avec IBDG

5. Conclusions

La complexité des réseaux de distribution actuels et la présence croissante de la génération distribuée (GD) à base d'énergies renouvelables dans les micro-réseaux nécessite des schémas de protection plus intelligents et adaptatifs. Dans un contexte où les micro-réseaux sont censés fonctionner selon divers modes de fonctionnement, les approches traditionnelles de la coordination des DOCR peuvent ne pas être fiables pour certaines topologies du micro-réseau avec GD. Dans cet article, une récente approche est proposée pour optimiser le temps de coordination des relais de surintensité directionnels DOCR dans les micro-réseaux. L'approche proposée, inspirée de l'équation physique du bilan de masse (EO), est utilisée afin d'obtenir des paramètres optimaux de TDS et PS.

Une comparaison a été faite avec d'autres modèles proposés dans la littérature, montrant l'efficacité de l'approche proposée. Dans tous les modes de fonctionnement du micro-réseau, la coordination obtenue avec le modèle proposé présentait des temps de fonctionnement inférieurs. Ce travail montre également que l'emploi des dispositifs de protection numérique ainsi que la mise en œuvre des métaheuristiques peuvent être utilisées pour explorer les caractéristiques non standard, et définies par l'utilisateur des OCR directionnels afin d'assurer une coordination de protection plus adéquate en présence des GD, ainsi que les courants de défauts perturbent la coordination des relais et les valeurs de CTI changent, ce qui entraînera un mauvais fonctionnement des relais. Donc, il est évident que la pénétration des SBDG est principalement inhibée en raison de leurs fortes injections de courant de défaut. D'autre part, la pénétration des IBDG est principalement inhibée en raison de leurs injections de courant harmonique élevé.

R E F E R E N C E S

- [1]. S. Roy, P. Surrech Babu and N. V. Babu, Optimal combined overcurrent and distance relay coordination using TLBO algorithm, Springer, Singapore, 2018.
- [2]. A. Draz, M. -M. Elkhololy and A.- A. El-Fergany, “Slime mould algorithm constrained by the relay operating time for optimal coordination of directional overcurrent relays using multiple standardized tripping curves”, Neural Computing and Applications., vol. 33, no. 18, Mar. 2021, pp. 11875-11887.
- [3]. N. EL Nailly, S. Saad, J. Wafi, T. EL Menfy and I. Lghneiwa, Optimization and evaluation of Overcurrent Relays Coordination In Benghazi Distribution Network Using Genetic Algorithm, Proceedings of The 5th International Conference on Control Engineering & Information Technology, Tunisia, Decem. 2019, pp. 72-77.
- [4]. D. Saha, A. Datta and P. Das, “Optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems using symbiotic organism search optimisation technique”, IET Generation, Transmission & Distribution., vol. 10, no. 11, Aug. 2016, pp. 2681-2688.
- [5]. J. Yu, C. -H. Kim, S. -B. Rhee, “The Comparison of Lately Proposed Harris Hawks Optimization and Jaya Optimization in Solving Directional Overcurrent Relays Coordination Problem”, Complexity., vol. 2020, no. 1, 2020, pp. 1-22.

- [6]. *F. -A. Albasri, A. -R. Alroomi and J. -H. Talaq*, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery.*, **vol. 30**, no. 4, 2015, pp. 1810–1820.
- [7]. *A. -A. El-Fergany and H.-M. Hasanien*, "Water cycle algorithm for optimal overcurrent relays coordination in electric power systems", *Soft Computer.*, **vol. 23**, no. 23, Feb. 2019, pp. 12761–12778.
- [8]. *S. -S. Gokhale and V. -S. Kale*, Application of the Firefly Algorithm to Optimal Over-Current Relay Coordination, in International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Romania, May. 2014, pp. 150–154.
- [9]. *M. Zellagui, R. Benabid, M. Boudour and A. Chaghi*, "Application of Firefly Algorithm for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays in the Presence Series Compensation", *Journal of Automation & Systems Engineering.*, **vol. 8**, no. 2, 2014, pp. 92-107.
- [10]. *S. Singh, J. -S. Nirbhaw, N. Nitin, N. -J. Singh, S. Sing, N. Narang*, "Implementation of Hybrid ABC-PSO Algorithm for Directional Overcurrent Relays Coordination Problem", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.*, **vol. 9**, no. 7, 2020, pp. 2278-3075, May.
- [11]. *T. Amraee*, "Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm", *IEEE transactions on power.*, **vol. 27**, no. 3, 2012, pp. 1415-1422.
- [12]. *P. -P. Bedakar and S. -R. Bhide*, "Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach", *IEEE Transactions on Power Delivery.*, **vol. 26**, no. 1, Jan. 2011, pp. 109-119.
- [13]. *S. Kamel, A. Korashy, A.-R. Youssef*, "Development and application of an efficient optimizer for optimal coordination of directional overcurrent relays", *Neural Computing & Applications.*, **vol. 32**, no. 12, Jun. 2020, pp. 8561-8583.
- [14]. *H. -R. Bouchekara, M. Zellagui, and M. -A. Abido*, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a modified electromagnetic field optimization algorithm," *Applied Soft Computing.*, **vol. 54**, May. 2017, pp. 267–283, 2017.
- [15]. *J. rangthem, S. -S. Dash, R. Ramaswami and K. -R. Krishnanand*, "Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays," *IET Generation, Transmission & Distribution.*, **vol. 7**, no. 4, 2013, pp. 329-336.
- [16]. *R. Thangaraj, M. Pant and K. Deep*, "Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms," *Engineering Applications of Artificial Intelligence.*, **vol. 23**, no. 5, Aug. 2010, pp. 820-829.
- [17]. *V. -N. Rajput and K. -S. Pandya*, "Coordination of directional overcurrent relays in the interconnected power systems using effective tuning of harmony search algorithm," *Sustainable Computing: Informatics and Systems.*, **vol. 15**, Sept. 2017, pp. 1-15.
- [18]. *A. Draz, M. -M. Elkholly and A. El-Fergany*, "Over-Current Relays Coordination Including Practical Constraints and DGs: Damage Curves, Inrush, and Starting Currents," *Sustainability.*, **vol. 14**, no. 5, Feb. 2022, pp. 2761.
- [19]. *P. Alae and T. Amraee*, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Meshed Active Distribution Network Using Imperialistic Competition Algorithm," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy.*, **vol. 9**, no. 2, March 2021, pp. 416-422.
- [20]. *V. -N. Rajput, K. -S. Pandya and K. Joshi*, Optimal coordination of Directional Overcurrent Relays using hybrid CSA-FFA method, in 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, Thailand, June. 2015, pp. 1-6.
- [21]. *A. Farmazi, M. Heidarnejad, B. Stephens and S. Mirjalili*, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge Based Systems.*, **vol. 191**, Mar. 2020, p. 1-21.

- [22]. *M. Zellagui, R. Benabid, A. Chaghi and M. Boudour*, “Impact studies of total harmonic distortion on directional overcurrent relay performance,” U.P.B. Scientific Bulletin Series C., **vol. 77**, no. 4, 2015, pp. 359-372.
- [23]. *M. Latroch, D. Rahiel, M. Khiat*, “Numerical overcurrent protective relay using the rms calculation based on the quadrature sampling method,” U.P.B. Scientific Bulletin Series C., **vol. 82**, no. 3, 2020, pp. 149-166.
- [24]. *Y. Gao, Y. Zhou and Q. Luo*, “An Efficient Binary Equilibrium Optimizer Algorithm for Feature Selection,” IEEE Access., **vol. 8**, Aug. 2020, pp. 140936-140963.
- [25]. *T. Jongwei and S. Mirjalili*, “General Learning Equilibrium Optimizer: A New Feature Selection Method for Biological Data Classification,” Applied Artificial Intelligence., **vol.35**, no. 3, 2021, pp. 247-263.
- [26]. *Qi. Hong, Z. Guanglei, J. Heming and X. Zhikai*, “A hybrid equilibrium optimizer algorithm for multi-level image segmentation,” Mathematical Biosciences and Engineering., **vol. 18**, no. 4, 2021, pp. 4648-4678.
- [27]. *B. Walke and N. -N. Jangle*, Impact of distributed generation on relay coordination, International Conference on Computing Methodologies and Communication, INDIA, July. 2017, pp. 882-887.