

**Jurnal Politeknik Caltex Riau**<https://jurnal.pcr.ac.id/index.php/elementer>

| ISSN : 2460 – 5263 (online) | ISSN : 2443 – 4167 (print)

Optimasi Setting *Directional Overcurrent Relay* Dengan Menggunakan *Hybrid* Algoritma Differential Evolution-Particle Swarm Optimization

Imam Suri Tauladan¹ dan Hendri Novia Syamsir²¹Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: imam@pcr.ac.id²Politeknik Caltex Riau, Departemen, email: hendri@pcr.ac.id

[1] Abstrak

Untuk mencegah adanya gangguan dan kerusakan peralatan pada sistem tenaga listrik diperlukan peranan sistem proteksi. Sistem proteksi yang tidak handal memiliki dampak kerugian ekonomi, hal inilah menjadi dasar para engineer untuk melakukan penelitian optimasi koordinasi proteksi pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk memastikan sistem proteksi dapat berjalan dengan baik jika terjadinya gangguan hubung singkat pada sistem. Selain itu, penelitian ini untuk mempermudah engineer dalam perhitungan studi koordinasi *Directional Overcurrent Relay* (DOCR). Berbeda dengan penelitian sebelumnya, dalam penelitian ini mengimplementasikan metode penggabungan algoritma pada sistem kelistrikan dengan mempertimbangkan skema operasi generator. Dengan adanya kondisi operasi generator yang selalu berubah-ubah, kondisi tersebut mempengaruhi waktu kerja DOCR. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, perlu melakukan setting DOCR yang optimal dengan menggunakan metode metaheuristik. Hal tersebut menjadi dasar peneliti untuk melakukan penelitian optimasi setting koordinasi proteksi. Setiap metode metaheuristik seperti *Differential Evolution Algorithm* dan *Particle Swarm Optimization* memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing dalam proses pencarian optimisasi. Oleh karena itu, penelitian ini mengimplementasikan strategi hybrid algoritma *Differential Evolution Algorithm* – *Particle Swarm Optimization* (DE-PSO) untuk mendapatkan nilai *Time Dial Setting* (TDS) DOCR. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan dengan menggunakan hybrid algoritma lebih efisien 83% dari metode non-hybrid.

Kata kunci: *Directional Overcurrent Relay*, *Differential Evolution Algorithm*, *Particle Swarm Optimization*

[2] Abstract

To prevent interference and damage to equipment in the electric power system, the role of a protection system is needed. An unreliable protection system has the impact of economic losses, this is the basis for engineers to conduct research on the optimization of protection coordination in the electric power system. This study aims to ensure that the protection system can run properly in the event of a short circuit fault in the system. In addition, this research is to facilitate engineers in the calculation of the *Directional Overcurrent Relay* (DOCR) coordination study. In contrast to previous studies, this research implements a hybrid algorithm method on a real electrical system by considering the generator operating scheme. Due to the generator operating conditions that are always changing, it affect DOCR working time. To overcome these problems, it is

necessary to set an optimal DOCR using the meta-heuristic method. This is the basis for researchers to conduct research on optimization of protection coordination settings. Each meta-heuristic method such as Differential Evolution Algorithm and Particle Swarm Optimization has its own advantages and disadvantages in the process of searching the optimization. Therefore, this research implements a hybrid strategy of Differential Evolution Algorithm – Particle Swarm Optimization (DE-PSO) to get the DOCR Time Dial Setting (TDS) value. From the results of the study, it can be concluded that using a hybrid algorithm is 83% more efficient than the non-hybrid method.

Keywords: *Directional Overcurrent Relay, Differential Evolution Algorithm, Particle Swarm Optimization*

1. Pendahuluan

Peranan peralatan pengaman sangat diperlukan sebagai peralatan yang mendeteksi adanya gangguan pada sistem tenaga listrik. Umumnya peralatan pengaman yang digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah *Overcurrent Relay* (OCR) atau relai arus lebih. Relai arus lebih berfungsi sebagai peralatan pengaman dari adanya gangguan arus lebih dan arus hubung singkat (*short circuit*) yang dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik. Prinsip kerja OCR yaitu untuk merasakan adanya gangguan dan mengisolasi gangguan secara cepat. Berdasarkan standar IEEE 242 koordinasi relai untuk industri dan komersial dimana interval waktu OCR bekerja 0,2-0,4 detik [1]. Namun, OCR tidak bekerja optimal jika diimplementasikan pada sistem kelistrikan konfigurasi ring bus dikarenakan adanya *bidirectional current flow*. Sehingga untuk mengatasi hal tersebut pada sistem ring bus, para *engineer* mendesain sistem proteksi dengan menggunakan *Directional Overcurrent Relay* (DOCR) [2]. DOCR bekerja untuk mengisolasi adanya gangguan dengan cepat yang sesuai dengan prinsip koordinasi proteksi.

Objek pada penelitian ini dengan mengimplementasikan metode *hybrid algorithm* pada sistem kelistrikan industri, dimana konfigurasi sistem menggunakan *ring bus* yang setiap *plant* saling terintegrasi. Pada masing-masing *plant* memiliki skema operasi pembangkit sehingga nilai arus hubung singkat berubah-ubah. Hal tersebut sangat berpengaruh terhadap setting koordinasi DOCR [3]. Selain permasalahan tersebut pada konfigurasi sistem *ring bus*, permasalahan menjadi lebih kompleks. Kondisi ini menjadikan para peneliti untuk mengembangkan metode dengan tujuan mempersingkat waktu dan hasil yang lebih optimal.

Beberapa metode metaheuristic telah banyak diusulkan untuk mengatasi permasalahan dalam koordinasi proteksi. Penelitian [4] melakukan perbandingan dengan menggunakan *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization Algorithm* (PSO) dan *Differential Evolution*. Dimana dari masing-masing *evolutionary algorithm* memiliki kelebihan dan kekurangan. Hasil dari penelitian tersebut dengan menggunakan algoritma DE lebih optimal. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh [2], dimana dengan menggunakan algoritma DE lebih optimal dibandingkan PSO. Namun dengan menggunakan algoritma DE dengan proses mutasi DE/rand/1 terkadang mengalami local minimum [5]. Metode DE dan PSO memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Kelebihan algoritma PSO cepat mencapai ke titik konvergen, namun terkadang PSO mencapai titik yang tidak optimal dikarenakan PSO tergantung dari update kecepatan dan posisi [6]. Sehingga perlu adanya modifikasi pada algoritma PSO untuk meredam kecepatan partikel. Berbeda dengan algoritma PSO, algoritma DE efisien dalam mencapai global optimum namun disisi lain untuk mencapai ke titik konvergen lebih lama dibandingkan PSO. Hal inilah mendorong penulis untuk melakukan penelitian dengan *hybrid* algoritma DE-PSO untuk setting DOCR yang diimplementasikan pada sistem kelistrikan industri.

2. Kajian Pustaka

Kajian pustaka dari penelitian ini menjelaskan beberapa penelitian yang terkait dan teori yang mendukung penelitian. Dalam kajian pustaka akan dijelaskan optimasi *setting* koordinasi proteksi DOCR pada sistem kelistrikan *ring bus*.

2.1 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Arus gangguan dapat menyebabkan kerusakan peralatan pada sistem kelistrikan, dikarenakan arus gangguan memiliki *magnitude* yang lebih besar dari pada arus beban [1]. Dalam sistem kelistrikan, gangguan yang sering terjadi antara lain adalah:

2.1.1 Gangguan *Overload*

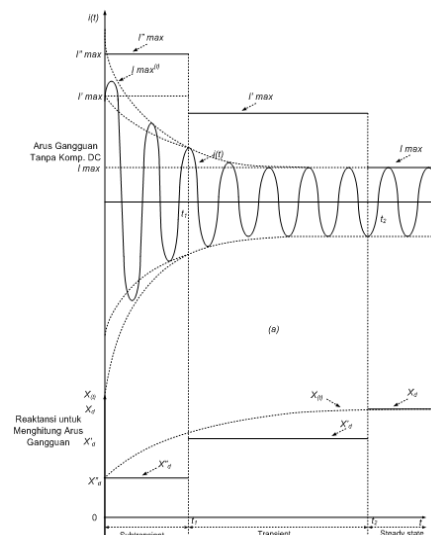
Gangguan beban lebih merupakan arus yang mengalir melebihi arus nominal dari peralatan listrik (FLA) [7]. Jika arus gangguan beban lebih berlangsung secara terus menerus, menyebabkan peralatan mengalami penurunan kemampuan dan dapat merusak peralatan.

2.1.2 Gangguan *Overvoltage*

Gangguan tegangan lebih terjadi pada faktor eksternal dan internal. Untuk faktor eksternal, gangguan sambaran petir akibat dari gesekan awan-awan, awan-tanah yang mengenai transmisi, busbar, dan peralatan. Untuk faktor internal, gangguan surja hubung seperti *open/close circuit breaker* 3 fasa yang tidak serempak.

2.1.3 Gangguan *Short Circuit*

Gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga listrik dapat menjadi dua kelompok yaitu hubung singkat simetri (hubung singkat 3 fasa) dan hubung singkat asimetri (hubung singkat 2 fasa, hubung singkat 2 fasa ke tanah, hubung singkat 1 fasa dan hubung singkat 1 fasa ke tanah). Terjadinya arus hubung singkat terjadi pada 3 segmen periode (*Subtransient*, *Transient* dan *Steady State*) yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Periode Gangguan Arus Hubung Singkat [8].

2.2 Setting *Directional Overcurrent Relay*

Relai arus lebih berarah (DOCR), pada umumnya sebagai solusi atau diaplikasikan pada sistem yang memiliki 2 arah. Sehingga relai DOCR sangat diperlukan, dikarenakan dapat membedakan arah arus untuk aktif atau non-aktif jika adanya gangguan. Relai DOCR merupakan kombinasi

antara relai OCR dan elemen arah. Agar relai dapat membedakan arah, maka bekerja berdasarkan pergeseran fasa. Saat *forward*, arus tertinggal terhadap tegangan (*lagging*) dan untuk *reverse* arus mendahului tegangan (*leading*).

Relai arus lebih berarah tidak boleh bekerja melebihi batas minimum dan maksimum arus yang ditentukan berdasarkan adanya arus input yang disensing oleh CT. Relai bekerja atau trip disaat kondisi arus gangguan I_f melebihi arus pick-up I_p . *Setting* arus pick-up I_p relai berdasarkan standar BS-142 terdapat pada Persamaan (1).

$$1,05 \cdot \text{Full Load Ampere} \leq I_{set} \leq 1,4 \cdot \text{Full Load Ampere} \quad (1)$$

Dimana untuk mendapatkan arus setting I_{set} dengan menggunakan Persamaan (2).

$$Tap = I_{set}/CT \text{ primary} \quad (2)$$

Koordinasi proteksi antar relai arus lebih dengan menggunakan karakteristik *standard invers relay*, dimana semakin besar arus gangguan maka waktu operasi semakin cepat [6]. Untuk mencari *time dial setting* relai terdapat pada Persamaan (3).

$$T_{op} = \frac{k \times TDS}{\beta \times \left[\left(\frac{I_f}{I_p} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (3)$$

Dimana:

K = Koefisien Standard Invers (0.14); T = Time Dial; I = Arus Kontribusi ; I_{set} = Arus Pickup; α = Koefisien Standard Invers (0.02); β = Koefisien Standard Invers (2.97)

Untuk waktu koordinasi relai utama dan relai *back-up* dengan *grading time* 0.2-0.4 detik mengacu pada standar IEEE 242 [1].

2.3 Algoritma Differential Evolution

Algoritma DE merupakan algoritma yang memanfaatkan proses evolusi pada setiap individu dalam populasi [9]. Adapun urutan proses algoritma DE adalah sebagai berikut:

2.3.1 Penentuan Awal Populasi

Penentuan awal populasi ditentukan dari hasil populasi yang dibangkitkan dengan batasan-batasan vektor inisialisasi dengan dimensi (D), *upper bounds* (U), dan *lower bounds* (L). Adapun untuk mmembangkitkan populasi secara acak dengan menggunakan Persamaan (4).

$$X_{j,i,0} = randj(0,1) \cdot (b_{j,u} - b_{j,L}) + b_{j,L} \quad (4)$$

2.3.2 Proses Mutasi

Untuk menghasilkan populasi baru, algoritma DE akan memutasi dan mengkombinasi populasi awal yang mana terjadi pada proses mutasi. Hasil dari mutasi tergantung dari strategi mutasi yang digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan strategi mutasi dasar DE/rand/1 yang terdapat pada Persamaan (5).

$$V_{i,g} = X_{r1,g} + F \cdot (X_{r2,g} - X_{r3,g}) \quad (5)$$

Dimana $V_{i,g}$ merupakan vektor mutan, F merupakan faktor scalar bernilai > 0 , dan nilai X_{r1} , X_{r2} dan X_{r3} dihasilkan secara acak dengan satu kali percobaan.

2.3.3 Proses Crossover

Proses persilangan akan menghasilkan *trial vector* dari hasil kombinasi *mutation vector* dan *target vector*. Persamaan (6) akan menghasilkan *trial vector*.

$$U_{i,g+1} = \begin{cases} V_{j,i,g+1} & \text{if } rand_j() \leq CR \text{ or } j = randb \\ X_{ji,g} & \text{if } rand_j() > CR \text{ or } j \neq randb \end{cases} \quad (6)$$

Dimana pada persamaan diatas, $rand_j(0,1)$ adalah evaluasi ke-j dari pembangkitan bilangan acak. Cr merupakan konstanta *crossover*.

2.3.4 Proses Selection

Dalam proses ini adalah pemilihan nilai *objective function* terbaik yang dihasilkan antara *mutant vector* (generasi turunan) dan *parents vector* (generasi orang tua). Persamaan (7) merupakan persamaan untuk mendapatkan populasi yang terbaik pada setiap generasi.

$$X_{i,g+1} = \begin{cases} U_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ X_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) > f(x_{i,g}) \end{cases} \quad (7)$$

2.4 Algoritma Particle Swarm Optimization

Algoritma PSO terinspirasi dari perilaku alamiah dari populasi atau partikel *swarm*. Berbeda dengan DE, kecepatan dan posisi partikel sangat menentukan proses optimasi [10]. Untuk mendapatkan optimasi dengan menggunakan PSO dengan menggunakan persamaan (8).

$$v_{t+1} = w \cdot v_t + c_1 \text{rand} \times (P_{\text{best}} - x^t) + c_2 \text{rand} \times (G_{\text{best}} - x^t) \quad (8)$$

Untuk mendapatkan w dengan menggunakan Persamaan (9).

$$w(t) = w_{\text{max}} - \left(\frac{w_{\text{max}} - w_{\text{min}}}{\text{maxiter}} \right) \times \text{iter} \quad (9)$$

Dimana:

V_t = Kecepatan Partikel Saat Ini; X_t = Posisi Partikel Saat Ini; P_{best} = Posisi Partikel Terbaik; G_{best} = Posisi Populasi Terbaik; C_1, C_2 = Koefisien Akselerasi; Rand = Bilangan Acak Mulai 0 hingga 1; R = Posisi Partikel yang diambil Secara Acak dari Populasi; V_{t+1} = Kecepatan Partikel pada Iterasi Berikutnya; X_{t+1} = Posisi Partikel pada Iterasi Berikutnya; w = Koefisien Inersia

3. Metodologi Penelitian

Untuk penjelasan alur pengerjaan penelitian ini akan dijelaskan secara rinci pada bagian ini.

3.1 Alur Diagram Penelitian

Untuk pengerjaan penelitian dimulai dari mencari referensi tentang koordinasi proteksi DOCR dengan menggunakan *artificial intelligence* atau dengan menggunakan metode *meta-heuristic*. Hal ini lah menjadi dasar untuk melakukan penelitian dengan menggunakan *hybrid* algoritma sebagai kontribusi penelitian dalam bidang optimasi koordinasi proteksi dengan menggunakan AI. Penelitian ini dengan mengimplementasikan metode yang diusulkan pada sistem kelistrikan real, sehingga diperlukan pengumpulan data sistem kelistrikan terlebih dahulu. Setelah pengumpulan data sistem kelistrikan, diperlukan *electrical system study* analisa aliran daya dan analisa arus hubung singkat dengan menggunakan *software* ETAP. Selanjutnya proses optimasi dengan menggunakan *hybrid* algoritma dengan menggunakan *software* Matlab. Setelah mendapatkan nilai setting TDS DOCR, selanjutnya melakukan uji coba pada ETAP.

3.2 Optimisasi Setting DOCR Dengan Menggunakan Hybrid Algoritma DE-PSO

Langkah pertama dalam proses optimasi dengan menggunakan *hybrid* algoritma DE-PSO yaitu menentukan skema operasi sistem. Dalam proses ini diperlukan data FLA, data CT, Nilai Arus Hubung Singkat Kontribusi pada Relai Primer dan Relai Backup. Langkah kedua yaitu

menentukan parameter DE (Probabilitas *Crossover*, *Scaling Factor*) dan PSO (*Inertia Weight*, Koefisien Akselerasi) dalam maksimum iterasi beserta ukuran populasi yang sama. Langkah ketiga yaitu mendapatkan populasi awal dengan menggunakan Persamaan (4) dengan batasan TDS sesuai dengan manufaktur relai yang digunakan. Pada penelitian ini dengan menggunakan relai SEPAM 40 dengan batasan TDS min = 0.1 dan TDS max = 12.5. Langkah keempat yaitu nilai populasi awal dikonversi ke domain waktu menggunakan persamaan (3). Selanjutnya nilai TDS di evaluasi dengan menggunakan Persamaan (10).

$$Min(OF) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1} Top_{i,j} \quad (10)$$

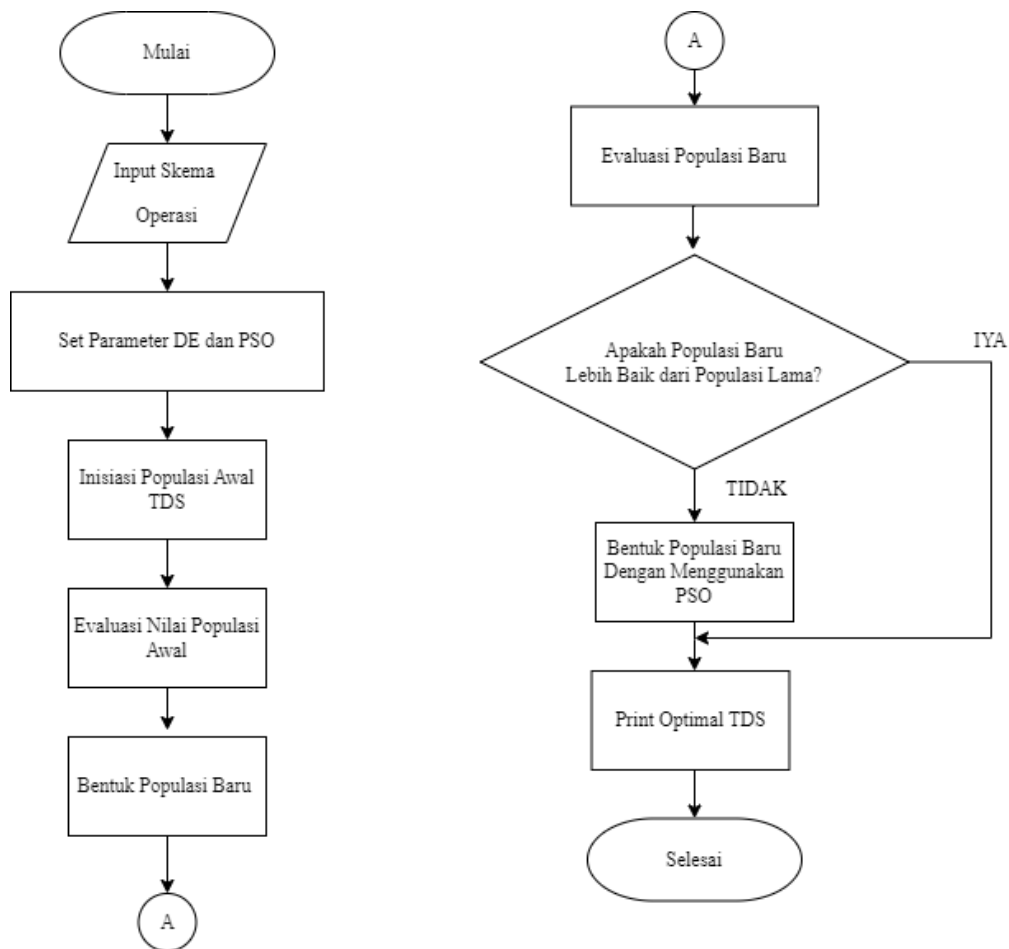
Dimana; *OF* merupakan fungsi objektif. *N* merupakan jumlah relai dalam sistem. *Top* merupakan operasi waktu relai *primer* pada saat gangguan. *i* menyatakan relai primer beroperasi sebagai *forward* dan *j* menandakan relai primer beroperasi sebagai *reverse*. Nilai evaluasi yang didapatkan harus memenuhi batasan waktu koordinasi yang telah ditentukan yang mengacu pada

$$T_{(i,j)backup} - T_{(i,j)prim} \geq CTI \quad (11)$$

Dimana: $T_{(i,j)prim}$ adalah operasi waktu kerja untuk relai primer dan $T_{(i,j)backup}$ adalah operasi waktu kerja untuk relai *back-up* dengan interval waktu sebesar 0,2-0,4s.

Langkah kelima yaitu membentuk populasi baru dengan menggunakan mengkombinasikan populasi awal dan populasi dari hasil proses mutasi dengan menggunakan strategi mutasi dasar. Langkah keenam seleksi nilai *fitness* dari evaluasi yang dilakukan. Hasil evaluasi baru harus lebih baik dari nilai yang lama berdasarkan prinsip algoritma DE yaitu nilai dari salah satu generasi yang terbaik akan digunakan. Jika *fitness* hasil dari proses mutasi lebih baik dari *fitness* populasi awal, maka populasi selanjutnya adalah populasi hasil dari proses mutasi. Jika tidak maka algoritma PSO akan aktif untuk mendapatkan populasi terbaik dengan menggunakan Persamaan (8) dan Persamaan (9), sehingga populasi selanjutnya akan digantikan oleh populasi yang dihasilkan oleh PSO.

Langkah keenam Proses penyilangan, nilai *fitness* baru lebih baik dari pada nilai *fitness* yang lama, maka nilai *fitness* lama akan tergantikan. Sedangkan jika nilai *fitness* lama lebih baik dari yang baru, maka nilai yang lama akan menggantikan nilai yang baru. Untuk lebih jelas alur diagram proses optimasi dengan menggunakan *hybrid* algoritma terdapat pada Gambar 2.

Gambar 2. Proses Optimasi Dengan Menggunakan *Hybrid* Algoritma DE-PSO.

4. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan antara dengan menggunakan algoritma DE dan menggunakan *hybrid* algoritma DE-PSO. Adapun nilai parameter setting *hybrid* algoritma DE-PSO adalah sebagai berikut:

DE

Ukuran populasi = 1000

Iterasi = 150

DE/rand/1:

Faktor Skala (F) = 0,1

Crossover (Cr) = 0,9

PSO

Ukuran populasi = 1000

Iterasi = 150

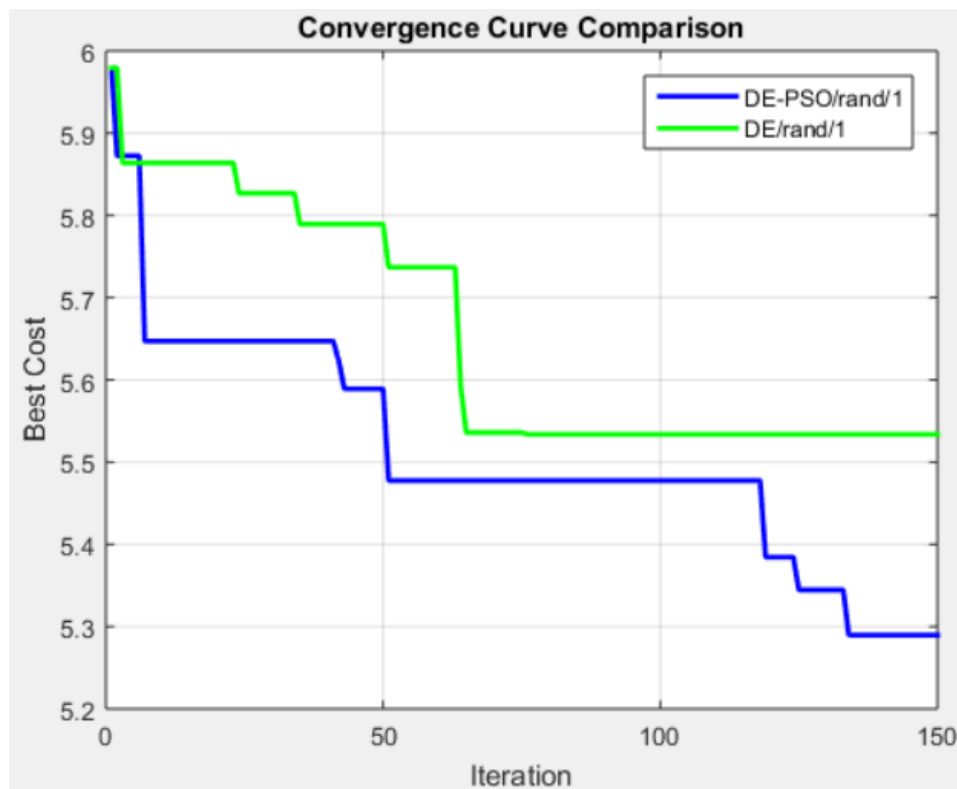
Konstantan Akselerasi Partikel (C1) = 0,3

Konstantan Akselerasi Partikel (C2) = 0,5

Bilangan random (rand) = 0-1

4.1 Skema 1: Optimasi Setting DOCR saat Operasi Normal

Kondisi skema 1, sistem kelistrikan setiap *plant* disuplai dari masing-masing generator. Setiap *plant* saling terinterkoneksi pada sistem kelistrikan konfigurasi *ring* bus. Dalam penelitian ini mengimplementasikan hasil optimasi TDS *setting* DOCR pada sistem kelistrikan industry yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Perbandingan Konvergensi Optimisasi.

Tabel 2. Hasil Optimasi TDS Setting DOCR

Primary Relay		Backup Relay	
ID	TDS	ID	TDS
R1-SG-01	0.36	R2-SG-02	0.36
R2-SG-02	0.36	R2-SG-03	0.26
R2-SG-03	0.26	R2-SG-04	0.30
R2-SG-04	0.30	R2-SG-05	0.28
R2-SG-05	0.28	R1-SG-01	0.36
R2-SG-01	0.32	R1-SG-05	0.30
R1-SG-05	0.30	R1-SG-04	0.36
R1-SG-04	0.36	R1-SG-03	0.30
R1-SG-03	0.30	R1-SG-02	0.24
R1-SG-02	0.24	R2-SG-01	0.32

Hasil simulasi waktu operasi antara relai primer dan relai backup dengan menggunakan ETAP terdapat pada Tabel 3. Dari hasil setting TDS DOCR, CTI antara relai primer dan relai backup berkisar diantara 0.2-0.4 s, sehingga dapat disimpulkan bahwa koordinasi proteksi relai DOCR telah memenuhi standar IEEE 242. Selain itu, dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan metode *hybrid* algoritma DE-PSO lebih optimal dibandingkan dengan menggunakan algoritma DE.

Tabel 3. Hasil Simulasi Waktu Operasi DOCR pada Skema 1.

MARGIN TIME RELAY UTAMA-BACKUP				
Relay		Waktu Operasi Relay (s)		CTI
Main	Back-up	Main	Back-up	
R1-SG-01	R2-SG-02	0.588	0.830	0.241
R2-SG-02	R2-SG-03	0.559	0.786	0.226
R2-SG-03	R2-SG-04	0.425	0.763	0.338
R2-SG-04	R2-SG-05	0.506	0.740	0.233
R2-SG-05	R1-SG-01	0.445	0.834	0.388
R2-SG-01	R1-SG-05	0.556	0.816	0.259
R1-SG-05	R1-SG-04	0.509	0.881	0.371
R1-SG-04	R1-SG-03	0.628	0.978	0.349
R1-SG-03	R1-SG-02	0.598	0.843	0.245
R1-SG-02	R2-SG-01	0.470	0.817	0.346

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian, dimana metode *hybrid* algoritma telah diimplementasikan pada sistem kelistrikan industri. Dari hasil optimasi dengan menggunakan metode *hybrid*, total waktu operasi relay lebih efisien 83% jika dibandingkan dengan hasil optimasi dengan menggunakan DE. Hal tersebut dikarenakan dengan menggunakan algoritma DE terkadang mengalami *local optimum*. Sehingga diperlukan suatu metode *hybrid* algoritma untuk memperbaiki performansi algoritma.

Untuk studi selanjutnya dalam optimisasi koordinasi proteksi menggunakan metode meta-heuristic, perlu adanya metode memodifikasi PSO. Selain itu dalam melakukan setting koordinasi harus mempertimbangkan skema *on/off Distributed Generator* (DG).

6. Daftar Pustaka

- [1] IEEE 242, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, Edition 2., no. 2008. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010.
- [2] I. S. Tauladan, V. R. Mahindara, M. Pujiantara, and A. Priyadi, "Optimized DOCR Setting by Considering Generator Scheme and Different Configuration on Ring System," *Proc. - 2021 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. Intell. Syst. New Norm. Era, ISITIA 2021*, pp. 202–209, 2021.
- [3] M. Y. Shih, A. Conde Enríquez, T. Y. Hsiao, and L. M. Torres Treviño, "Enhanced differential evolution algorithm for coordination of directional overcurrent relays," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 365–375, 2017.
- [4] M. N. Alam, B. Das, and V. Pant, "A Comparative Study of Metaheuristic Optimization Approaches for Directional Overcurrent Relays Coordination," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 128, pp. 39–52, 2015.
- [5] K. Opara and J. Arabas, "Comparison of mutation strategies in Differential Evolution – A probabilistic perspective," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 39, pp. 53–69, 2018.
- [6] D. Rahmatullah *et al.*, "Setting Docr Adaptif Pada Sistem Distribusi Dengan Pembangkit Tersebar Menggunakan Algoritma Pso - Neural Network Adaptive Docr Setting on Distribution Systems With Distributed Generation Using Pso-Neural Network Algorithm," 2017.

- [7] H. Marta yudha, *Rele Proteksi Prinsip dan aplikasi*, 1st ed. Inderalaya: Teknik Elektro Fakultas Teknik UNSRI, 2008.
- [8] I. S. Tauladan *et al.*, *SETTING DIRECTIONAL OVERCURRENT RELAY ADAPTIF PADA SISTEM CLOSED LOOP RING BUS DENGAN SKEMA GENERATOR DAN FEEDER*. 2021.
- [9] J. Moirangthem, K. R. Krishnanand, S. S. Dash, and R. Ramaswami, "Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 4, pp. 329–336, 2013.
- [10] D. Zhang and B. Wei, "Comparison between differential evolution and particle swarm optimization algorithms," *2014 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. IEEE ICMA 2014*, no. 3, pp. 239–244, 2014.