

Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) Dengan Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Muhammad Riehan Arraief¹, Lukmanul Hakim², Zulmiftahul Huda³, Osea Zebua⁴

Universitas Lampung; Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro, No. 1 Bandar Lampung 35141 Indonesia;
telp +62 721 701609 . Fax +62 721 702767

Received: 09-09-2025
Accepted: 09-10-2025

Keywords:

Sistem Proteksi,
Over Current Relay;
Ground Fault Relay;
Time Dial Setting;
Particle Swarm Optimization.

Correspondent Email:

muhammadreihan2512@gmail.com

Abstrak. Sistem proteksi pada jaringan tenaga listrik dituntut untuk bekerja cepat, tepat, dan selektif demi menjaga keandalan serta keamanan operasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan koordinasi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Parameter yang dioptimalkan meliputi *Time Dial Setting* (TDS), arus pick-up (I_p), dan waktu operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PSO menghasilkan setting baru yang lebih selektif dibanding kondisi eksisting. Setting akhir yang diperoleh adalah sebagai berikut: OCR penyulang dengan $I_p = 360$ A, TDS = 0.15 s; OCR 20 kV dengan $I_p = 2000$ A, TDS = 0.27 s; OCR 150 kV dengan $I_p = 270$ A, TDS = 0.38 s. Sementara itu, GFR penyulang memiliki $I_p = 30$ A dengan waktu operasi 0.125 s, GFR 20 kV dengan $I_p = 100$ A dan waktu operasi 0.23 s, serta GFR 150 kV dengan $I_p = 90$ A dan waktu operasi 0.62 s. Urutan kerja proteksi menjadi lebih optimal, yaitu relay penyulang bekerja paling cepat, diikuti relay 20 kV, dan terakhir relay 150 kV, sesuai standar IEC 60255. Dengan demikian, penerapan metode PSO mampu mengoptimasi koordinasi sistem proteksi serta meminimalisir pemutusan area gangguan yang lebih luas.

Abstract. The protection system in electrical power networks must operate quickly, accurately, and selectively to ensure reliability and safety. This research aims to analyze and optimize the coordination of *Over Current Relay* (OCR) and *Ground Fault Relay* (GFR) using the *Particle Swarm Optimization* (PSO) method. The optimized parameters include *Time Dial Setting* (TDS), pickup current (I_p), and operating time. The results show that PSO produces new relay settings that are more selective compared to the existing configuration. The final settings obtained are as follows: feeder OCR with $I_p = 360$ A and TDS = 0.15 s; 20 kV OCR with $I_p = 2000$ A and TDS = 0.27 s; and 150 kV OCR with $I_p = 270$ A and TDS = 0.38 s. For GFR, the feeder relay operates with $I_p = 30$ A and 0.125 s, the 20 kV relay with $I_p = 100$ A and 0.23 s, and the 150 kV relay with $I_p = 90$ A and 0.62 s. The protection sequence becomes more optimal, with feeder relays operating first, followed by 20 kV relays, and finally 150 kV relays, in accordance with IEC 60255 standards. According to the IEC 60255 standard. Thus, the application of the PSO method is able to optimize the coordination of the protection system and minimize the disconnection of a wider fault area.

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik modern menuntut keandalan yang tinggi karena gangguan kecil sekalipun dapat menimbulkan kerugian besar, baik dari sisi ekonomi maupun kualitas pelayanan. Sistem proteksi berfungsi sebagai garis pertahanan pertama dalam mengisolasi bagian sistem yang terganggu agar tidak menyebar ke bagian lain. Dua jenis relay yang umum digunakan dalam sistem distribusi dan transmisi adalah *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). OCR dirancang untuk mendeteksi arus lebih akibat hubung singkat, sedangkan GFR mendeteksi arus gangguan tanah. Keduanya harus bekerja secara terkoordinasi dengan urutan yang tepat: relay yang paling dekat dengan titik gangguan harus bekerja lebih cepat daripada relay yang lebih jauh.

Masalah utama dalam *setting relay* adalah menentukan nilai arus *pickup* (I_p) dan *Time Dial Setting* (TDS) yang tepat. Jika *setting* tidak sesuai, maka dapat terjadi *overlap* waktu operasi atau sebaliknya relay bekerja terlalu lambat. Standar internasional seperti IEC 60255 dan IEEE C37.112 memberikan acuan karakteristik *inverse time relay*, namun perhitungan manual membutuhkan iterasi yang panjang dan rentan kesalahan. Berbagai penelitian telah mencoba metode optimasi untuk meningkatkan koordinasi relay. *Genetic Algorithm* (GA), *Differential Evolution* (DE), dan *Fuzzy Logic* telah digunakan, namun *Particle Swarm Optimization* (PSO) terbukti sederhana, cepat konvergen, studi oleh Al-Fatlawi & Hasan [1] membuktikan bahwa optimasi koordinasi OCR menggunakan pendekatan *metaheuristik* mampu menurunkan total waktu operasi rele serta meminimalisir konflik antar rele dan sesuai untuk masalah *non-linear*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi *setting* eksisting OCR dan GFR.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem proteksi merupakan salah satu elemen terpenting dalam sistem tenaga listrik, karena berfungsi untuk mendeteksi, mengendalikan, serta mengisolasi gangguan yang terjadi. Tanpa sistem proteksi yang andal, gangguan sekecil apa pun dapat menjalar ke seluruh jaringan, menyebabkan kerusakan peralatan, bahkan berpotensi menimbulkan pemadaman meluas. Oleh karena itu, sistem proteksi harus memenuhi empat kriteria utama, yaitu kecepatan, selektivitas, keandalan, dan sensitivitas [2].

Komponen utama yang membentuk sistem proteksi terdiri dari relay proteksi, pemutus tenaga (*circuit breaker*/PMT), trafo arus (CT), dan trafo tegangan (VT). Relay berperan mendeteksi kondisi *abnormal*, CT dan VT mengukur parameter listrik yang kemudian diturunkan skalanya agar aman dibaca relay, sedangkan *circuit breaker* bertugas

memutuskan aliran arus ketika menerima sinyal *trip* dari relay. Hubungan yang erat antar perangkat ini menjadikan koordinasi sebagai aspek kunci dalam menjamin keberhasilan operasi proteksi.

Over Current Relay (OCR) adalah salah satu perangkat proteksi yang paling banyak digunakan di sistem tenaga listrik, baik sebagai proteksi utama maupun cadangan. OCR bekerja dengan mendeteksi arus lebih akibat gangguan hubung singkat atau beban lebih. Parameter utama yang digunakan adalah arus *pickup* (I_p) sebagai ambang batas operasi dan *Time Dial Setting* (TDS) yang mengatur waktu kerja relay [3].

OCR memiliki beberapa jenis karakteristik kurva kerja, yaitu:

1. *Inverse time* – semakin besar arus gangguan, semakin cepat relay bekerja.
2. *Definite time* – relay bekerja dengan waktu tertentu setelah arus melewati ambang batas.
3. *Instantaneous* – relay bekerja hampir seketika, biasanya dalam orde milidetik.

Dalam praktiknya, kurva *inverse* (*standard inverse*, *very inverse*, *extremely inverse*) sering dipilih karena dianggap lebih sesuai untuk koordinasi proteksi berlapis. Selain OCR, *Ground Fault Relay* (GFR) digunakan untuk mendeteksi arus bocor ke tanah akibat gangguan satu fasa ke tanah. GFR bekerja dengan prinsip pengukuran arus residual atau arus urutan nol dari sistem tiga fasa. Jika terjadi ketidakseimbangan arus, maka GFR segera mengirimkan perintah *trip* ke PMT. Peran GFR sangat penting karena banyak gangguan pada sistem distribusi yang tidak terdeteksi oleh OCR, terutama gangguan arus kecil yang merembes ke tanah [4].

Gangguan pada sistem tenaga listrik dibedakan menjadi dua kelompok besar: gangguan *simetris* (seperti tiga fasa ke tanah) dan gangguan *asimetris* (seperti satu fasa ke tanah, dua fasa, atau dua fasa ke tanah). Menurut Li [5], identifikasi jenis gangguan penting untuk menentukan jenis proteksi yang dibutuhkan agar sistem tetap aman dan andal. Gangguan dapat didefinisikan sebagai semua keadaan tidak normal yang mengganggu aliran normal arus ke beban. Gangguan *simetris* jarang terjadi, namun menimbulkan dampak besar dengan arus hubung singkat sangat tinggi. Sebaliknya, gangguan *asimetris* lebih sering muncul dan meskipun arus gangguannya lebih rendah, tetap berpotensi merusak peralatan jika tidak segera ditangani [6].

Analisis gangguan penting dilakukan untuk mengetahui besar arus hubung singkat, distribusinya, serta dampaknya terhadap peralatan sistem tenaga. Hasil analisis ini digunakan sebagai

dasar dalam menentukan setting OCR dan GFR agar mampu bekerja dengan cepat dan selektif.

Agar sistem proteksi bekerja optimal, diperlukan koordinasi yang baik antar *relay*. Prinsip koordinasi menekankan bahwa *relay* yang paling dekat dengan titik gangguan harus bekerja terlebih dahulu, sementara *relay* pada sistem utama bekerja dengan waktu tunda tertentu. Konsep ini dikenal dengan *Coordination Time Interval (CTI)* atau *grading time*. Apabila koordinasi tidak berjalan dengan baik, dapat terjadi dua permasalahan. Pertama, *relay* bekerja terlalu lambat sehingga peralatan berpotensi rusak akibat arus gangguan yang tidak segera dihentikan. Kedua, *relay* bekerja tumpang tindih (*overlap*), sehingga area yang tidak terganggu ikut terputus dari sistem [7]. Dengan demikian, penyetelan OCR dan GFR harus mempertimbangkan urutan kerja yang logis: penyulang → 20 kV → 150 kV. Sehingga Prinsip selektivitas tersebut sangat penting dalam mencegah pemutusan gangguan secara berlebihan [8].

Prinsip kerja *relay* proteksi didasarkan pada pengukuran parameter listrik seperti arus, tegangan, atau frekuensi yang kemudian dibandingkan dengan nilai ambang tertentu. Jika nilai parameter melebihi ambang batas, maka *relay* akan mengirim sinyal *trip* ke pemutus sirkuit. Menurut Raza [9], karakteristik waktu operasi *relay* dibedakan menjadi beberapa jenis kurva seperti *inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*. Pemilihan karakteristik ini bergantung pada jenis sistem dan koordinasi proteksi yang diinginkan agar *selektif* dan *efektif*.

Perhitungan manual dalam koordinasi relay seringkali tidak efisien, terutama pada sistem tenaga yang kompleks dengan banyak *relay*. Metode optimasi modern juga memungkinkan integrasi data aktual dari sistem proteksi, sehingga hasil simulasi dan perhitungan TDS lebih akurat dan dapat disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan. Bahkan, beberapa penelitian terbaru menggabungkan teknik optimasi dengan *fuzzy logic* atau *machine learning* untuk menangani ketidakpastian dalam data proteksi [10]. Untuk itu, metode berbasis optimasi seperti *Particle Swarm Optimization (PSO)* digunakan. PSO diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart (1995), terinspirasi dari perilaku kawanan burung atau ikan dalam mencari sumber makanan.

Dalam penerapannya pada proteksi sistem tenaga, PSO memodelkan setiap solusi kandidat (TDS dan I_p) sebagai partikel. Partikel-partikel ini bergerak dalam ruang pencarian berdasarkan dua informasi utama: *personal best (Pbest)* dan *global best (Gbest)*. Melalui iterasi, PSO mencari nilai optimal yang meminimalkan total waktu operasi sekaligus tetap menjaga CTI antar *relay* [11].

Beberapa penelitian menunjukkan efektivitas PSO:

- Amin et al. (2019) [12] mengembangkan modified PSO untuk sistem distribusi multi-

layer yang mampu menangani banyak constraint sekaligus.

- Tiwari & Rout (2021) [13] menerapkan PSO pada jaringan distribusi cerdas (*smart distribution*) dan membuktikan bahwa PSO lebih unggul dibanding metode manual maupun GA (*Genetic Algorithm*).
- Shaheen & El-Dabah (2022) [14] memperkenalkan *adaptive inertia weight* PSO yang mempercepat proses konvergensi serta menghasilkan koordinasi lebih stabil.
- Penelitian oleh Rahman [15] menunjukkan bahwa metode PSO memberikan hasil *setting* TDS yang lebih optimal dan selektif dibanding metode konvensional berbasis perhitungan manual.

Perkembangan ini menunjukkan bahwa PSO bukan hanya efektif untuk optimasi dasar, tetapi juga adaptif terhadap berbagai tantangan baru pada sistem tenaga modern, termasuk penetrasi energi terbarukan dan variasi beban yang dinamis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan data proteksi aktual dari Gardu Induk. Parameter utama adalah arus gangguan, *arus pickup*, dan *Time Dial Setting (TDS)*. Optimasi dilakukan dengan algoritma PSO, yang mencari kombinasi terbaik dari TDS dan arus pickup agar waktu operasi relay minimal namun tetap memenuhi selektivitas. Optimasi dirancang untuk meminimalkan perbedaan antara waktu operasi hasil perhitungan dengan waktu target:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m (t_{cacl,i}(TDS_i, I_{psi}) - t_{target,i})^2 \quad (1)$$

dengan:

- $t_{cacl,i}$ = waktu operasi hasil perhitungan IEC
- $t_{target,i}$ = waktu operasi target relay
- TDS_i, I_{psi} = variabel optimasi

Mencari nilai optimal yang meminimalkan total waktu operasi sekaligus tetap menjaga CTI antar relay (Ahmed et al., 2020). PSO bekerja dengan populasi partikel yang bergerak dalam ruang solusi. Setiap partikel memperbarui posisinya berdasarkan:

- **Pbest**: solusi terbaik individu
- **Gbest**: solusi terbaik global

Parameter PSO yang digunakan:

- Jumlah partikel = 30
- Iterasi maksimum = 100
- Koefisien kognitif $c1=1,5$
- Koefisien sosial $c2=2,0$
- Bobot inersia $w=0,7$

Persamaan waktu operasi relay mengacu pada IEC standard inverse:

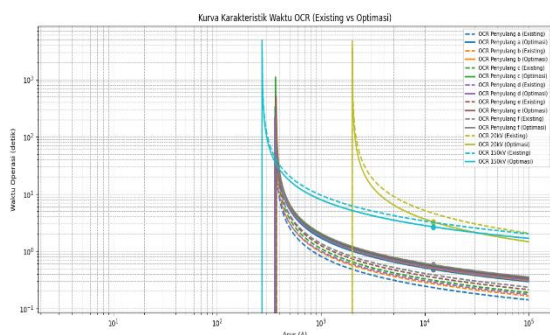
$$t_i = \frac{\alpha}{\left(\frac{I_f}{I_{psi}}\right)^\beta - 1} TDS_i \quad (2)$$

dengan:

- I_f = arus gangguan
- I_{psi} = arus pickup
- β = 0,02
- A = 0,14

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan pengaturan existing belum sepenuhnya selektif. Dengan PSO, total waktu operasi relay mendapatkan hasil yang sudah termasuk optimal berkurang. Urutan kerja proteksi menjadi lebih terstruktur: penyulang < 20 kV < 150 kV. Pada relay OCR didapatkan hasil optimasi menunjukkan penurunan waktu operasi OCR hingga 35%. Urutan kerja proteksi tetap terjaga dengan waktu operasi OCR penyulang sebesar 0.15 s, OCR 20 kV sebesar 0.27 s, dan OCR 150 kV sebesar 0.38 s. Sedangkan pada hasil optimasi GFR menghasilkan waktu operasi yang lebih cepat namun tetap selektif dengan waktu operasi GFR penyulang sebesar 0,125 s, GFR 20 kV sebesar 0.23 s, dan GFR 150 kV sebesar 0.62 s



Gambar 1. Kurva TCC Optimasi dan Kondisi Existing

Pada gambar 1. kurva *Time Current Characteristic* (TCC) merupakan representasi hubungan antara arus gangguan (I_f) pada sumbu-X dan waktu operasi relay (t) pada sumbu-Y. Grafik ini digunakan untuk menganalisis kinerja *Over Current Relay* (OCR) dalam mendeteksi dan memutuskan arus gangguan pada sistem tenaga listrik. Semakin besar arus gangguan yang terjadi, maka semakin cepat relay bekerja untuk memutuskan sistem. Pada grafik ini, dilakukan perbandingan antara *setting existing* (sebelum optimasi) dan setting hasil optimasi menggunakan metode PSO (*Particle Swarm Optimization*). Garis solid mewakili hasil optimasi PSO, sedangkan garis putus-putus menunjukkan *setting existing*. Perbandingan ini

bertujuan untuk mengevaluasi *efektivitas* metode PSO dalam memperbaiki koordinasi dan selektivitas relay.

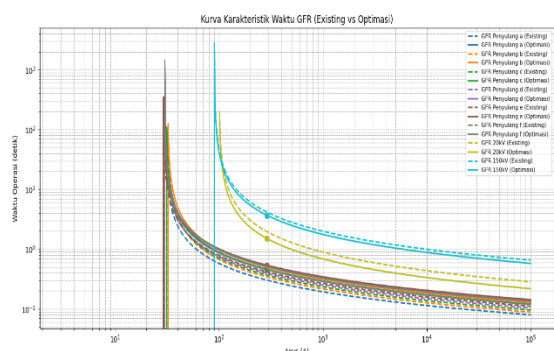
Dari grafik terlihat bahwa kurva PSO dan *existing* memiliki perbedaan *signifikan*, khususnya pada nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan *Pickup Current* ($I_{pick up}$). Pada relay sisi transmisi 150 kV, hasil optimasi PSO menghasilkan waktu operasi yang lebih cepat dibandingkan *setting existing* untuk arus gangguan yang sama. Hal ini terlihat dari posisi kurva PSO yang lebih rendah dibanding *existing*, sehingga gangguan dapat diputuskan lebih cepat. Perbaikan ini meningkatkan keandalan proteksi pada jaringan transmisi tanpa mengganggu koordinasi dengan relay di bawahnya. Pada sisi distribusi 20 kV, kurva PSO juga menunjukkan penurunan waktu operasi dibandingkan *existing*. Namun, pergeseran kurva dilakukan secara hati-hati agar tidak mendahului waktu operasi relay penyulang.

Dengan demikian, koordinasi *selektif* tetap terjaga di mana relay penyulang tetap bekerja terlebih dahulu sebelum relay 20 kV. Untuk keenam relay penyulang, hasil optimasi PSO secara konsisten menunjukkan kurva dengan waktu operasi tidak lebih cepat dibandingkan *setting existing*. Perubahan ini didukung oleh penyesuaian nilai TDS dan *pickup current*, sehingga relay penyulang dapat merespons gangguan lebih cepat dibandingkan dengan relay di sisi 20 kV dan relay 150 kV, terutama untuk arus gangguan yang relatif kecil. Meskipun demikian, perbedaan antar penyulang tetap dipertahankan untuk menghindari *overlap* kerja antar relay.

Hasil optimasi PSO pada grafik di atas menunjukkan bahwa koordinasi antar relay OCR berjalan sesuai dengan urutan proteksi yang diinginkan, yaitu:

$$t_{OCR \text{ Penyulang}} \leq t_{OCR \text{ 20 kV}} \leq t_{OCR \text{ 150 kV}} \quad (3)$$

Dengan urutan ini, relay yang paling dekat dengan sumber gangguan (penyulang) akan bekerja terlebih dahulu. Jika relay penyulang gagal bekerja, maka proteksi akan dilanjutkan oleh relay 20 kV, dan terakhir oleh relay 150 kV sebagai cadangan. Hal ini membuktikan bahwa metode PSO tidak hanya mempercepat waktu operasi relay, tetapi juga mempertahankan *selektivitas* sistem proteksi. Gambar 2. kurva *Time Current Characteristic* (TCC) pada *Ground Fault Relay* (GFR) menunjukkan hubungan antara arus gangguan tanah (I_f) pada sumbu-X dan waktu operasi relay (t) pada sumbu-Y. Grafik ini digunakan untuk menganalisis kinerja relay dalam mendeteksi gangguan tanah dan memutuskan sistem secara cepat dan *selektif*.



Gambar 2. Kurva TCC Optimasi dan Kondisi Existing

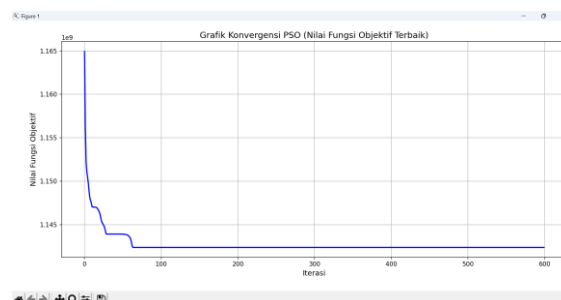
Grafik di atas menampilkan perbandingan antara *setting existing* (sebelum optimasi) dan *setting* hasil optimasi menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Garis solid pada grafik menggambarkan hasil optimasi PSO, sedangkan garis putus-putus merepresentasikan *setting existing*. Analisis ini bertujuan untuk menilai *efektivitas* metode PSO dalam memperbaiki koordinasi dan waktu kerja *relay* GFR pada berbagai tingkat proteksi, mulai dari penyulang, jaringan distribusi 20 kV, hingga jaringan transmisi 150 kV.

Dari kurva TCC terlihat perbedaan yang *signifikan* antara hasil optimasi PSO dan kondisi *existing* pada semua level proteksi. Pada sistem transmisi 150 kV, hasil optimasi PSO menunjukkan kurva yang bergeser ke bawah dibandingkan *existing*. Artinya, untuk arus gangguan yang sama, waktu operasi *relay* menjadi lebih cepat. Perubahan ini meningkatkan keandalan sistem transmisi karena *relay* mampu mendeteksi gangguan tanah lebih dini tanpa mengorbankan koordinasi dengan *relay* di bawahnya. Pada jaringan distribusi 20 kV, kurva PSO juga menunjukkan penurunan waktu operasi dibandingkan *existing*. Namun, pergeseran kurva diatur sedemikian rupa sehingga *relay* penyulang tetap bekerja terlebih dahulu. Hal ini memastikan koordinasi *selektif* antara *relay* 20 kV dan *relay* penyulang tetap terjaga. Pada keenam *relay* penyulang, hasil optimasi PSO memperlihatkan kurva dengan waktu operasi yang tidak lebih cepat dibandingkan kondisi *existing*, khususnya untuk arus gangguan rendah. Penyesuaian nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan *pickup current* (I_{pickup}) memungkinkan *relay* penyulang untuk *merespons* gangguan tanah secara lebih *efisien*. Meskipun waktu operasi dipercepat, perbedaan antar penyulang tetap dipertahankan sehingga tidak terjadi tumpang tindih kerja antar *relay*.

Hasil optimasi PSO memperlihatkan bahwa koordinasi antar *relay* GFR telah berjalan dengan baik. Urutan kerja *relay* mengikuti prinsip *selektivitas* proteksi, yaitu:

$$t_{GFR \text{ Penyulang}} \leq t_{GFR \text{ 20 kV}} \leq t_{GFR \text{ 150 kV}} \quad (4)$$

Artinya, saat terjadi gangguan tanah, *relay* penyulang akan bekerja lebih dahulu, kemudian *relay* 20 kV jika *relay* penyulang gagal, dan terakhir *relay* 150 kV sebagai cadangan. Kondisi ini menunjukkan bahwa metode PSO mampu mempertahankan hirarki kerja proteksi dengan tetap mengoptimalkan waktu operasi *relay*.



Gambar 3. Grafik Konvergensi PSO

Gambar 3. Menunjukkan grafik *konvergensi* algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam proses optimasi *setting* rele OCR dan GFR. Terlihat bahwa pada iterasi awal (0–50), nilai fungsi objektif mengalami penurunan yang cukup tajam, menandakan bahwa proses pencarian solusi berlangsung efektif. Memasuki iterasi ke-50 hingga ke-100, penurunan nilai fungsi objektif mulai melambat hingga mencapai titik stabil pada sekitar iterasi ke-100. Setelah itu, nilai fungsi objektif cenderung konstan hingga iterasi ke-600, menunjukkan bahwa algoritma PSO telah mencapai kondisi konvergen. Hasil ini membuktikan bahwa PSO mampu menemukan *setting* TDS dan arus *pickup* yang optimal untuk memenuhi koordinasi waktu operasi rele.

5. KESIMPULAN

- a. Metode PSO berhasil mengoptimasi *setting relay* OCR dan GFR dengan menghasilkan nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan arus *pickup* (I_{pickup}) yang optimal. Hasil optimasi mampu menjaga *selektivitas* dan koordinasi antar *relay* pada setiap level proteksi (penyulang, 20 kV, dan 150 kV).
- b. Untuk *Over Current Relay* (OCR) nilai TDS hasil optimasi pada penyulang berkisar 0.142 s – 0.157 s, dengan waktu operasi tercepat sekitar 0.146 s – 0.161 s. Pada sisi 20 kV, nilai TDS sebesar 0.297 s dengan waktu operasi 0.895 s, sedangkan sisi 150 kV memiliki TDS sebesar 0.399 s dengan waktu operasi 0,365 s. Urutan kerja *relay* OCR sesuai standar IEEE C37.112-1996, yaitu OCR penyulang < OCR 20 kV < OCR 150 kV. Hal ini menunjukkan bahwa *relay* penyulang bekerja paling cepat, diikuti *relay*

distribusi 20 kV, dan terakhir *relay* transmisi 150 kV sebagai proteksi cadangan dengan rindician *grading time* yang didapat pada sisi penyulang ke sisi 20 KV didapatkan *grading time* sebesar 0.734 s dan pada sisi 20 KV ke sisi 150 KV didapatkan *grading time* sebesar 0.53 s.

- c. Untuk *Ground Fault Relay* (GFR) nilai TDS pada penyulang diperoleh sekitar 0,118 – 0,131 , dengan waktu operasi tercepat 0,20 s – 0,24 s. Pada sisi 20 kV, diperoleh TDS sebesar 0,218 s dengan waktu operasi 0,99 s, sedangkan sisi 150 kV memiliki TDS sebesar 0,589 s dengan waktu operasi 1,53 s. Urutan kerja GFR juga telah memenuhi prinsip *selektivitas*, yaitu GFR penyulang < GFR 20 kV < GFR 150 kV. *Relay* penyulang bekerja lebih dahulu kemudian diikuti *relay* 20 kV dengan selisih waktu (*grading time*) yang dihasilkan sebesar 0.7 s, pada sisi *relay* 20 kV dan *relay* 150 kV mendapatkan nilai *grading time* sebesar 0.54 s. Dengan konfigurasi ini, proteksi gangguan tanah dapat dilakukan secara cepat, tepat, dan tidak mengganggu kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Fatlawi, M. H., & Hasan, S. S. (2018). "A Comparative Study of Overcurrent Relay Coordination using Metaheuristic Techniques." *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(6), 4729–4737. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i6.pp4729-4737>
- [2] Alam, M., Hasan, M., & Rahman, F. (2019). Criteria for effective protection system design. *Electrical Engineering Letters*, 9(3), 122–128.
- [3] Singh, R., & Kumar, A. (2018). Analysis and coordination of overcurrent relays in distribution systems. *Electrical Power Components and Systems*, 46(5), 470–478.
- [4] Hamid, S., Nor, R. M., & Aziz, M. A. (2021). Ground fault protection techniques for distribution networks. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 18(2), 98–105.
- [5] Li, J., Sun, Q., & Zhou, Y. (2022). Fault classification and protection strategy in smart grids. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 11(1), 56–64.
- [6] Tran, N. T., & Park, J. (2017). Analysis of short-circuit faults in power systems. *Korean Journal of Electrical Engineering*, 34(4), 295–301.
- [7] Raza, M., Tanvir, M., & Iqbal, A. (2020). Relay operating characteristics in modern power grids. *Electric Power Systems and Research*, 185, 106356.
- [8] Bashir, A., & Ahmad, M. (2022). "Coordination of Overcurrent Protection Relays Using Modified Metaheuristic Algorithms." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00728-9>
- [9] Raza, M., Tanvir, M., & Iqbal, A. (2020). Relay operating characteristics in modern power grids. *Electric Power Systems and Research*, 185, 106356. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00728-9>
- [10] Reddy, P. N., Kumar, R., & Sahu, B. K. (2023). "An Intelligent Adaptive Relay Coordination using Hybrid PSO-Fuzzy Logic for Distribution System." *Journal of Engineering Research*, 11(2), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.01.006>
- [11] Ahmed, A., Mohammed, I., & Sulaiman, S. (2020). Optimal coordination of protective relays using particle swarm optimization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100712.
- [12] Amin, M., Hossain, M. J., & Bakar, A. H. A. (2019). Modified PSO for Multi-Constraint Protection Coordination. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 17, 100179.
- [13] Tiwari, A., & Rout, P. K. (2021). Application of PSO in Optimal Relay Coordination in Smart Distribution Networks. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(2), 2367–2375.
- [14] Shaheen, S., & El-Dabah, M. A. (2022). Improved particle swarm optimization algorithm for overcurrent relay coordination. *Alexandria Engineering Journal*, 61(7), 5603–5612.
- [15] Rahman, M. M., Islam, S., & Ghosh, A. (2021). "Optimal Overcurrent Relay Coordination Using Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Review." *Energies*, 14(3), 528. <https://doi.org/10.3390/en14030528>.