



Koordinasi Rele Arus Lebih di Perusahaan Nikel Indonesia Menggunakan Grasshopper Optimization Algorithm

Riko Satrya Fajar Jaelani Putra¹, Aulia Rahma Annisa², Yudi Andika³, Sholahuddin Muhammad Irsyad⁴, Rahmat Basya Shahrys Tsany⁵

¹Teknik Otomasi, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²Teknik Otomasi, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

³Teknik Pengelasan, Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

⁴Teknik Otomasi, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

⁵Teknik Perpipaan, Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

¹riko.satrya@ppns.ac.id*, ²auliaannisa@ppns.ac.id, ³yudi.andika@ppns.ac.id, ⁴muhammad.irsyad@ppns.ac.id,

⁵rahmatbasya@ppns.ac.id

Abstract

Sustainable energy availability is crucial for maintaining industrial productivity. Power outages can damage electrical equipment. Protection systems function to minimize and eliminate disruptions quickly, selectively, and a coordinated manner to minimize system damage. For overcurrent relays, in particular, time dial setting (TDS) is a crucial aspect to consider when coordinating protection. TDS regulates the relay's operating time to safeguard the electrical system. Manual calculations are commonly used to determine the TDS value. Trial and error methods are often used to coordinate relays. This method has evolved into intelligent algorithms that can find solutions effectively and quickly, one such algorithm being the grasshopper optimization algorithm (GOA). The simulation results show that grey wolf optimization (GWO) converge faster, but GOA gets a shorter relay operating time and a coordination time interval (CTI) that is closer to the standard which relay works faster and more sensitive. The results of the simulation in this study obtained the coordination value between relay 4 working at 0.1 seconds & relay 3 working at 0.3 seconds when a disturbance occurs on transformer 2, relay 3 working at 0.297 seconds & relay 2 working at 0.496 seconds when a disturbance current occurs on bus 4, relay 2 working at 0.492 seconds & relay 1 working at 0.493 when a disturbance current occurs on bus 3 and the performance of relay 1 which is only primary to secure the generator works at 0.354 seconds when a disturbance current occurs on bus 2 has produced an accurate TDS calculation value and still complies with the minimum CTI setting rules between the primary relay and the backup relay, which is 0.2 seconds in one voltage rating and close to 0 in different voltage ratings.

Keywords: protection systems, overcurrent relay, time dial setting, grasshopper optimization algorithm, coordination time interval

Abstrak

Ketersediaan energi yang berkelanjutan penting untuk menjaga produktivitas industri. Gangguan listrik akan merusak peralatan listrik. Sistem proteksi berfungsi untuk meminimalkan hingga menghilangkan gangguan secara cepat, selektif, dan terkoordinasi demi meminimalkan kerusakan sistem. Khususnya untuk rele arus lebih, *time dial setting* (TDS) merupakan aspek penting yang harus dipertimbangkan perihal koordinasi proteksi. TDS mengatur waktu operasi rele untuk mengamankan sistem kelistrikan. Umumnya, perhitungan manual digunakan untuk menentukan nilai TDS. Metode *trial and error* sering digunakan untuk mengoordinasikan rele satu sama lain. Metode ini telah berkembang menjadi algoritma cerdas yang dapat menemukan solusi secara efektif dan cepat, salah satu algoritmanya adalah *grasshopper optimization algorithm* (GOA). Hasil simulasi menunjukkan *grey wolf optimization* (GWO) konvergen lebih cepat, namun GOA mendapatkan waktu operasi rele lebih kecil dan *coordination time interval* (CTI) yang mendekati standar sehingga rele bekerja lebih cepat dan sensitif. Hasil dari simulasi pada penelitian ini didapatkan nilai koordinasi antara rele 4 bekerja pada 0,1 detik & rele 3 bekerja pada 0,3 detik saat timbul gangguan pada trafo 2, rele 3 bekerja pada 0,297 detik & rele 2 bekerja pada 0,496 detik saat timbul arus gangguan pada bus 4, rele 2 bekerja pada 0,492 detik & rele 1 bekerja pada 0,493 saat timbul arus gangguan pada bus 3 serta kinerja rele 1 yang hanya sebagai primer untuk mengamankan generator bekerja pada 0,354 detik saat timbul arus gangguan pada bus 2 telah menghasilkan nilai perhitungan TDS yang akurat serta masih mematuhi aturan pengaturan minimum nilai CTI antara rele primer dan rele cadangan yaitu 0,2 detik dalam satu rating tegangan dan mendekati 0 di rating tegangan yang berbeda.

Kata kunci: sistem proteksi, rele arus lebih, *time dial setting*, grasshopper optimization algorithm, *coordination time interval*

Diterima Redaksi : 04-10-2025 | Selesai Revisi : 10-12-2025 | Diterbitkan Online : 31-12-2025

1. Pendahuluan

Dalam sistem tenaga listrik, sistem proteksi sangat penting, terutama untuk melindungi peralatan listrik dari arus gangguan. Tujuan utama sistem proteksi adalah memilih fungsi proteksi yang memenuhi persyaratan kecepatan, sensitivitas, selektivitas, dan keandalan. Sistem proteksi umumnya dikelola dengan mengoordinasikan pengaturan rele [1]. Rele yang sering digunakan dalam sistem proteksi adalah rele arus lebih atau *over current relay* (OCR) [2]. Koordinasi rele arus lebih diperlukan untuk mendapatkan sistem proteksi yang baik sehingga kerusakan peralatan dapat dihindari [3]. Pada rele arus lebih, parameter yang dapat diatur untuk menentukan pengaturan rele arus lebih adalah arus *pickup* (I_p), jenis kurva, dan *time dial setting* (TDS) [4]. Rele primer harus segera aktif saat terjadi arus gangguan untuk melindungi sistem dari gangguan. Namun demikian, jika rele primer sistem gagal melindunginya, rele cadangan harus berusaha mengisolasi gangguan menggunakan standar CTI yang disarankan.

Penerapan metode optimasi menggunakan algoritma dalam sistem proteksi dapat meningkatkan optimasi kerja rele sehingga rele dapat bekerja optimal saat terjadi gangguan. Penelitian sebelumnya telah menggunakan algoritma genetika berbasis algoritma [5], seperti penggunaan *particle swarm optimization* (PSO) [6], *firefly algorithms* (FA) [7], dan algoritma *grey wolf optimization* (GWO) [8]. Algoritma yang digunakan dalam penelitian ini adalah *grasshopper optimization algorithm* (GOA) [9].

GOA merupakan algoritma yang mengadaptasi perilaku belalang dan persamaan matematika GOA didasarkan pada karakteristik belalang dalam mencari sumber makanan [10]. Penelitian ini memberikan solusi baru untuk mendapatkan nilai TDS yang praktis agar rele arus lebih dapat bekerja optimal menggunakan algoritma GOA untuk sistem proteksi sistem guna mendapatkan pengaturan proteksi terbaik. Penelitian ini juga menyajikan perbandingan antara metode GWO dengan metode yang diusulkan.

Format makalah ini disusun seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Bagian I menerangkan pendahuluan pengambilan topik penelitian. Bagian II merepresentasikan teori yang digunakan dalam penelitian. Bagian III menampilkan hasil penelitian dan analisa. Terakhir pada bagian IV kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

2. Metode Penelitian

Gangguan listrik dapat muncul pada sistem tenaga listrik. Gangguan tersebut harus diminimalkan dengan menggunakan proteksi tenaga listrik. Proteksi dalam sistem kelistrikan berfokus pada pengurangan kerusakan peralatan akibat gangguan [11]. Koordinasi

proteksi telah berkembang lebih jauh, meningkatkan keamanan, selektivitas, dan keandalan sistem proteksi [12].

2.1. Rele Arus Lebih

Untuk mengatur rele arus jenis *inverse time*, beberapa parameter harus dimasukkan, termasuk pengaturan *I pickup* dan *time dial*. Dalam British Standard 142, batasan dalam menentukan pengaturan nilai *I pickup* pada rele waktu terbalik sebagai proteksi dari arus lebih adalah [4]:

$$1.05 FLA < I_p < 1.4 FLA \quad (1)$$

Sebagai pelindung hubung singkat, I_p (*I pickup*) rele tidak boleh melebihi batas tertentu, yaitu:

$$1.6 FLA < I_p < 0.8 I_{SC MIN} \quad (2)$$

di mana *full load ampere* (FLA) adalah arus yang mengalir pada beban berdasarkan daya maksimum (Ampere), dan $I_{sc min}$ adalah arus yang diperlukan untuk hubung singkat (I_{sc} 2 fasa) selama kondisi tunak (30 siklus) (Ampere) [13].

Rele arus lebih *inverse time* bekerja ketika terdapat beban berlebih. Pengaturan pengambilan rele arus lebih dapat ditentukan dengan mengatur nilai tap. Pengaturan ini dapat menggunakan persamaan:

$$Tap = \frac{I_{set}}{Primer CT} \quad (3)$$

Keterangan I_{set} adalah arus pickup dari rele dan CT Primer adalah jumlah lilitan pada trafo arus.

Rele arus lebih juga membutuhkan nilai TDS untuk bekerja, perhitungan nilai TDS dapat menggunakan rumus berikut:

$$top = \frac{k \times TDS}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (4)$$

Keterangan *top* adalah waktu kerja rele (detik), TDS adalah *time dial setting*, I mewakili arus gangguan rele (Ampere), I_{set} mewakili arus pengambilan rele (Ampere), k , α , β tercantum sebagai koefisien kurva *inverse time* yang ada pada tabel I di bawah ini:

Tabel 1. Kurva Koefisien Inverse Time

Curve Type	Coefficient		
	k	α	β
Long Time Inverse	120	1	13.3 3
Standard Inverse	0.14	0.02	2.97

Very Inverse	13.5	1	1.5
Extremely Inverse	80	2	0.80 8
Ultra Inverse	315. 2	2.5	1

Interval waktu koordinasi atau *coordination time interval* (CTI) adalah selisih waktu antara rele cadangan dan primer. Berikut rekomendasi pengaturan CTI minimum untuk rele elektromekanik dan rele statis menurut standar IEEE 242-2001, yang disajikan pada Tabel II di bawah ini:

Tabel 2. CTI Minimum

Component	Time (s)	
	Electro mechanical	Static
Circuit breaker for opening time	0.08	0.08
Relay overtravel	0.1	0
Tolerance of relay and setting errors	0.12	0.12
Total of CTI	0.3	0.2

2.2. Formulasi Permasalahan

Formulasi permasalahan koordinasi OCR dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu fungsi objektif, variabel kontrol, dan fungsi kendala.

A. Fungsi Objektif

Total waktu operasi rele primer, yang merupakan titik awal untuk masalah optimasi koordinasi rele, diilustrasikan sebagai berikut:

$$OF = \sum_{i=1}^n w_i top_{i,primary} \quad (5)$$

Keterangan OF merupakan fungsi objektif, n merupakan jumlah rele, w_i mendefinisikan bobot rele yang ditetapkan untuk semua rele, to menunjukkan waktu operasi rele.

B. Variabel Kontrol dan Fungsi Konstrain

TDS bertindak sebagai variabel kontrol. TDS dikonfigurasi untuk mendapatkan nilai operasi rele terbaik. Namun, dalam pengaturan rele, rele memiliki batasan operasional dan fisik berikut:

$$top_{min} \leq top_i \leq top_{max} \quad (6)$$

$$TDS_{min} \leq TDS_i \leq TDS_{max} \quad (7)$$

$$Iset_{min} \leq Iset_i \leq Iset_{max} \quad (8)$$

Keterangan top_{min} dan top_{max} menentukan waktu operasi rele minimum dan maksimum (top_i) (Ampere), TDS_{min} dan TDS_{max} mewakili nilai TDS minimum dan maksimum (TDS_i), dan $Iset_{min}$ dan $Iset_{max}$ menentukan arus pickup minimum dan maksimum rele ($Iset_i$) (Ampere).

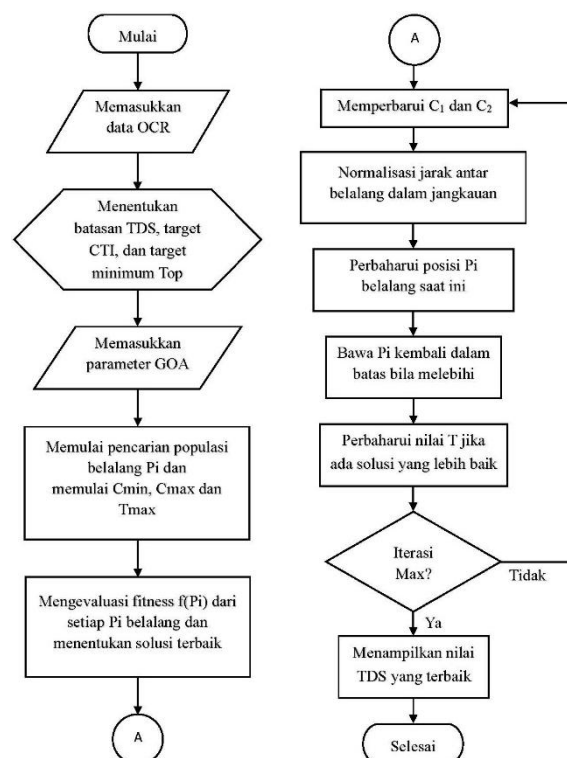
Koordinasi rele arus lebih dibatasi oleh CTI dalam hal waktu operasi rele primer dan cadangan. Persamaan berikut menampilkan rumus untuk keduanya.

$$top_{backup} - top_{primary} \geq CTI \quad (9)$$

Keterangan top_{backup} merupakan total waktu rele cadangan beroperasi sedangkan $top_{primary}$ merupakan total waktu rele primer beroperasi.

2.3. Grasshopper Optimization Algorithm

Algoritma terbaru yang diterbitkan Saremi dan rekan-rekannya [9] disebut grasshopper optimization algorithm (GOA). GOA adalah algoritma kecerdasan berjenis *swarm* yang mengadaptasi cara belalang mencari makan dan berkerumun secara alami. Belalang umumnya dikenal sebagai serangga perusak atau dengan kata lain, hama yang dapat merusak tanaman. Namun, sekelompok belalang termasuk dalam kawanannya terbesar dari semua makhluk hidup. Meskipun dikenal sebagai hama, perilaku belalang di alam dapat menginspirasi mereka untuk mengadaptasi perilaku mereka dengan sistem kecerdasan buatan.



Gambar 1. Diagram Alir

Aplikasi teknik kelistrikan untuk GOA meliputi penjadwalan, penyimpanan, kendali sistem tenaga, kendali sistem energi terbarukan, dan proteksi listrik. Banyak kendala mengenai optimasi dapat diselesaikan menggunakan metode ini [14]. Pertama, untuk penjadwalan, dalam penelitian ini, diusulkan teknik penjadwalan daya hibrida baru yang disebut HGOA [15]. Teknik ini didasarkan pada GOA dan *differential evolution* (DE). Dengan menurunkan tagihan listrik, strategi ini digunakan untuk menentukan harga terbaik. Hasilnya menunjukkan bahwa HGOA mengungguli teknik pembandingan lainnya. Kedua, aplikasi untuk sistem tenaga, penelitian ini mengusulkan pengontrol PID fuzzy yang dioptimalkan GOA multi-area LFC, sistem MG jaringan dan dibandingkan dengan pengontrol PID, pengontrol yang direkomendasikan memberikan respons dinamis yang lebih baik untuk sistem tenaga yang sama. [16]. Hasil penelitian lain yang menyediakan AGOA untuk menyelesaikan masalah OPF menunjukkan bahwa metode ini lebih unggul dan lebih efisien daripada teknik yang dipublikasikan sebelumnya [17].

Ketiga, aplikasi untuk sistem tenaga jaringan mikro. GOA disajikan dalam karya ini untuk unit DG berbasis inverter di MG pulau, dan kinerjanya dibandingkan dengan sistem kontrol sebelumnya untuk tujuan kontrol MG yang sama telah ditetapkan dengan cukup baik. GOA juga digunakan untuk merencanakan jaringan mikro yang tidak bergantung pada jaringan listrik dan terdiri dari turbin angin, panel surya, bank baterai, dan mesin diesel. [18]. Hasil simulasi yang diperoleh telah membuktikan nilai dari pendekatan inovatif dan kreatif yang disebutkan di atas untuk mengurangi biaya jaringan mikro yang tidak bergantung pada jaringan dan kompleksitas komputasi pemecahan masalah [19]. Terakhir, penggunaan GOA untuk aplikasi perlindungan. GOA menganalisis kurva konvergensi dan mendekati hasil terbaik dari pembangkitan terdistribusi terbarukan [10]. Hal ini memberikan minimum fungsi multi-objektif dalam solusi terbaik.

Penerapan GOA untuk teknik kelistrikan sangat beragam dan telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Dalam studi ini, nilai TDS ditentukan menggunakan GOA untuk mengatur rele arus lebih, dan hasilnya kemudian diterapkan pada rangkaian listrik yang digunakan. Awalnya, deskripsi sistem GOA yang akan disimulasikan ditentukan dari awal pengoperasian sistem dengan memasukkan parameter untuk menentukan nilai TDS dan parameter GOA hingga hasil simulasi hingga akhir. Gambaran umum sistem GOA ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 1.

3. Hasil dan Pembahasan

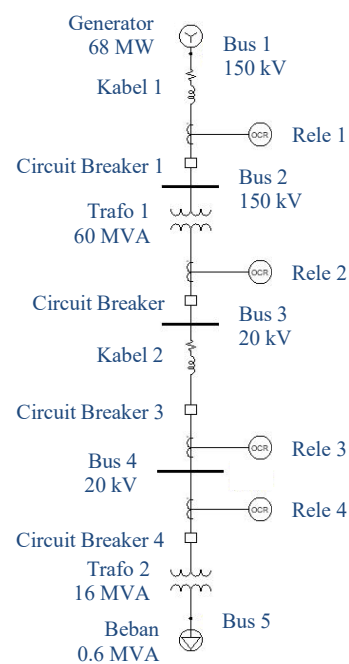
Simulasi ini menggunakan sistem *single line diagram* dari salah satu industri nikel di Indonesia kemudian disederhanakan menjadi sistem radial dengan mengacu pada titik beban terjauh. Gambar 2 menampilkan

gambaran sistem kelistrikan. Jaringan listrik digunakan untuk menyediakan daya, yang kemudian disalurkan melalui 2 trafo dan 4 bus yang akan melayani 1 beban dengan kapasitas 0.6 MVA.

Parameter proteksi dan data rele ditunjukkan pada Tabel III. GOA digunakan untuk menemukan nilai TDS (*time dial setting*) menggunakan aplikasi MATLAB. Arus gangguan yang disimulasikan terjadi pada setiap bus untuk menemukan nilai koordinasi rele arus lebih. Simulasi dilanjutkan dengan menggunakan aplikasi ETAP. Analisis kemudian dilakukan menggunakan hasil yang dikembalikan oleh ETAP.

Tabel 3. Data *Single Line Diagram*

Relay No	kV	Iscmax Primer (A)	Iscmax Cadangan (A)	FLA	Ip
1	150	1310	823	230.9	243
2	11	10660	10560	3148	3308
3	11	21330	20640	1837	1960
4	11	20640	0	839.8	888

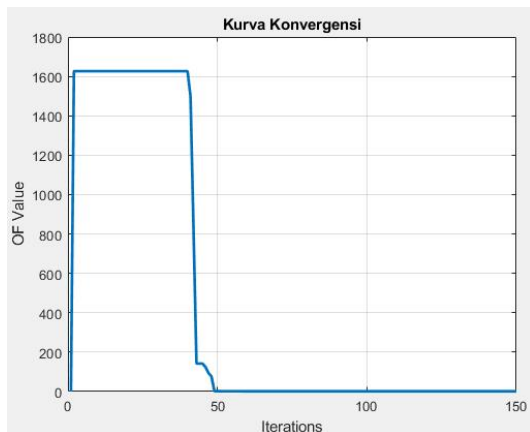


Gambar 2. *Single Line Diagram*

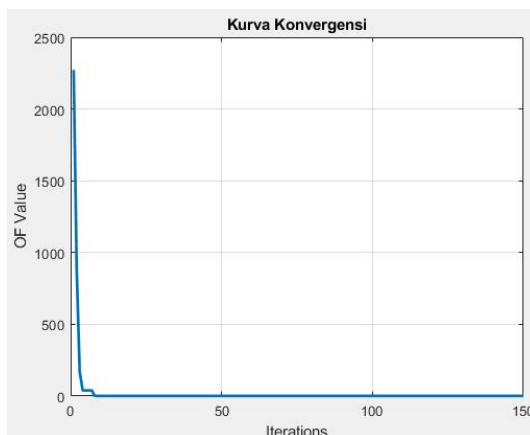
Pertama, sistem disimulasikan menggunakan aplikasi ETAP dengan acuan pada gambar 2. Simulasi dimulai dengan studi aliran daya. Kemudian melakukan simulasi proteksi dengan memasukkan semua parameter rele arus lebih sesuai pada tabel III. Langkah selanjutnya adalah mencari nilai TDS menggunakan MATLAB dengan memasukkan parameter tabel III. MATLAB memproses perhitungan TDS berdasarkan persamaan (3) untuk mencari nilai Iset dan persamaan

(4) untuk mencari nilai TDS, serta mempertimbangkan batasan TDS pada persamaan (5).

Simulasi telah dilakukan dengan menggunakan jumlah populasi sebanyak 50 dan iterasi 150 kali. Sebelumnya dilakukan perbandingan terlebih dahulu antara metode GOA (metode yang diusulkan) dengan metode GWO (*grey wolf optimization*). Mulanya membandingkan kecepatan konvergensi kedua buah metode. Gambar 3 menunjukkan kurva konvergensi metode GOA dan gambar 4 adalah kurva konvergensi metode GWO. Dari kedua hasil tersebut dapat dikatakan GWO lebih cepat menemukan hasil perhitungan dibanding GOA.



Gambar 3. Kurva Konvergensi GOA



Gambar 4. Kurva Konvergensi GWO

Langkah selanjutnya adalah membandingkan kedua metode dalam hasil perhitungan dalam mendapatkan nilai TDS yang akan digunakan. Gambar 5 adalah hasil perhitungan metode GOA, sedangkan gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan metode GWO. Dari kedua hasil metode, dapat dilihat GOA mendapatkan waktu operasi rele (TOP) lebih kecil dibandingkan GOA sehingga operasi rele lebih cepat dibandingkan GWO dan nilai CTI di GOA lebih singkat dibanding GWO dengan mendekati 0.2 detik dalam satu tegangan dan mendekati 0 dalam beda tegangan. Dapat disimpulkan bahwa GWO lebih cepat dalam kecepatan konvergensi, namun hasil TDS di GOA lebih baik,

ditunjukkan dengan waktu operasi dan CTI, sehingga rele bekerja secara cepat mengamankan gangguan.

Rele Primer				Rele Backup				
Relay No	Ip	TDS	TOP	Relay No	Ip	TDS	TOP	CTI
1	243	0.258	0.3549	0	0	0.00	0.0000	0.0000
2	3500	0.235	0.4921	1	243	0.258	0.4924	0.0003
3	1500	0.343	0.2963	2	3500	0.235	0.4963	0.2000
4	1152	0.126	0.1000	3	1500	0.343	0.3001	0.2001

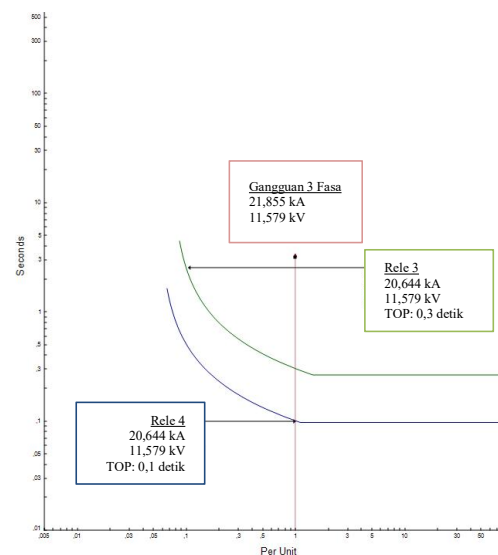
Gambar 5. Hasil Simulasi GOA

Rele Primer				Rele Backup				
Relay No	Ip	TDS	TOP	Relay No	Ip	TDS	TOP	CTI
1	243	0.263	0.3616	0	0	0.00	0.0000	0.0000
2	3500	0.236	0.4947	1	243	0.263	0.5018	0.0071
3	1500	0.344	0.2973	2	3500	0.236	0.4990	0.2017
4	1152	0.127	0.1006	3	1500	0.344	0.3011	0.2005

Gambar 6. Hasil Simulasi GWO

Hasil perhitungan nilai TDS menggunakan GOA kemudian dimasukkan ke dalam aplikasi ETAP untuk mendapatkan kurva arus dan waktu atau *time current curve* (TCC) sebagai berikut:

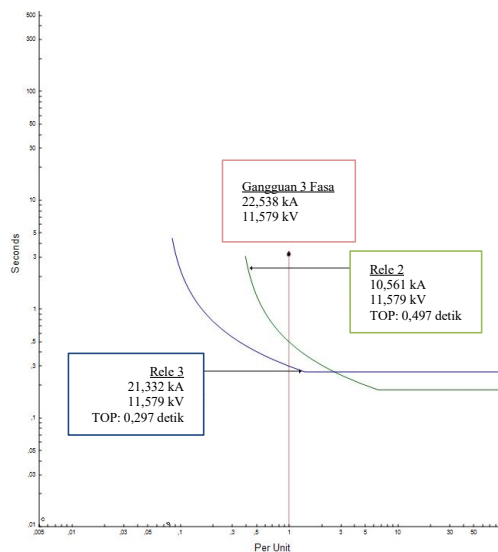
A. Koordinasi Rele 4 dan Rele 3



Gambar 7. Koordinasi Proteksi Rele 4 dan Rele 3

Gambar 7 menunjukkan saat arus gangguan muncul pada trafo 2. Gangguan yang muncul diamankan oleh rele 4 sebagai rele primer yang ditandai dengan garis biru kemudian dilanjutkan oleh rele 3 sebagai rele cadangan yang ditandai dengan garis hijau. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele 4 bekerja pada detik ke 0,1 dengan pengaturan nilai TDS 0,126 serta rele 3 bekerja pada detik ke 0,3 dengan pengaturan nilai TDS 0,343. Kerja rele telah memenuhi batas minimum CTI 0,2.

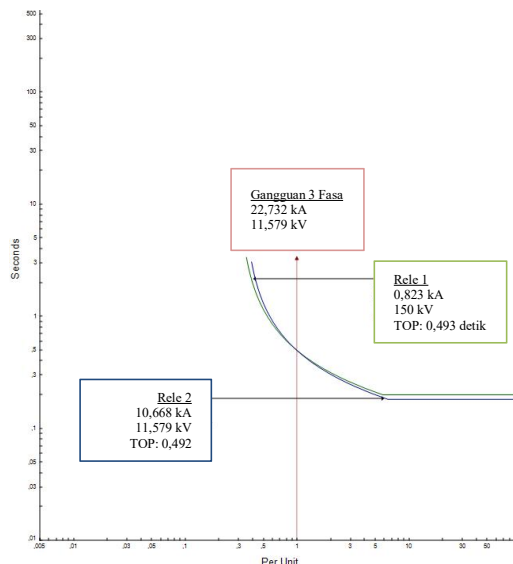
B. Koordinasi Rele 3 dan Rele 2



Gambar 8. Koordinasi Proteksi Rele 3 dan Rele 2

Gambar 8 menunjukkan saat arus gangguan muncul pada bus 4. Gangguan yang muncul diamankan oleh rele 3 sebagai rele primer yang ditandai dengan garis biru kemudian dilanjutkan oleh rele 2 sebagai rele cadangan yang ditandai dengan garis hijau. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele 3 bekerja pada detik ke 0,297 dengan pengaturan nilai TDS 0,343 serta rele 2 bekerja pada detik ke 0,497 dengan pengaturan nilai TDS 0,235. Kerja rele telah memenuhi batas minimum CTI 0,2.

C. Koordinasi Rele 2 dan Rele 1

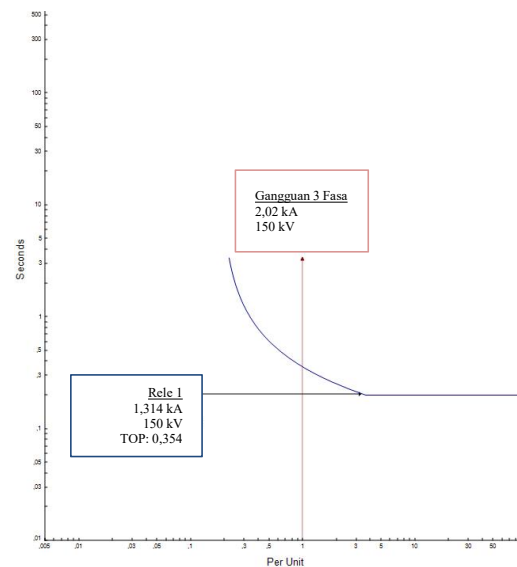


Gambar 9. Koordinasi Proteksi Rele 2 dan Rele 1

Gambar 9 menunjukkan saat arus gangguan muncul pada bus 3. Gangguan yang muncul diamankan oleh rele 2 sebagai rele primer yang ditandai dengan garis biru kemudian dilanjutkan oleh rele 1 sebagai rele cadangan yang ditandai dengan garis hijau. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele 1 bekerja pada detik

ke 0,492 dengan pengaturan nilai TDS 0,235 serta rele 1 bekerja pada detik ke 0,493 dengan pengaturan nilai TDS 0,258.

D. Koordinasi Rele 1



Gambar 10. Operasi Rele 1

Gambar 10 menunjukkan saat arus gangguan muncul pada bus 2. Gangguan yang muncul diamankan oleh rele 1 sebagai rele primer yang ditandai dengan garis biru. Rele ini tidak memiliki rele cadangan karena berada di paling atas rangkaian dan umumnya untuk melindungi generator, sehingga tidak ada rele lagi diatasnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele 1 bekerja pada detik ke 0,254 dengan pengaturan nilai TDS 0,258.

4. Kesimpulan

Dalam studi ini, *time dial setting* (TDS) untuk koordinasi rele arus lebih ditentukan menggunakan grasshopper optimization algorithm (GOA). *Single line diagram* dari industri nikel di Indonesia digunakan untuk mengaplikasikan metode yang diusulkan. GOA menunjukkan kemampuannya untuk menentukan konfigurasi rele TDS, mengurangi waktu operasi penjumlahan, dan mempertahankan keandalan margin koordinasi. GOA dibandingkan dengan grey wolf optimization (GWO) dengan GWO mampu konvergen lebih cepat dibanding GOA, namun GOA mampu mendapatkan nilai TDS lebih kecil sehingga rele mampu bekerja lebih cepat dan lebih sensitif dibanding GWO. Perangkat lunak ETAP digunakan untuk memverifikasi hasil dari metode GOA.

Hasil dari simulasi GOA pada penelitian ini didapatkan nilai koordinasi antara rele 4 bekerja pada 0,1 detik & rele 3 bekerja pada 0,3 detik saat timbul gangguan pada trafo 2, rele 3 bekerja pada 0,297 detik & rele 2 bekerja pada 0,497 detik saat timbul arus gangguan pada bus 4, rele 2 bekerja pada 0,492 detik & rele 1 bekerja pada 0,493 saat timbul arus gangguan pada bus 3 serta

kinerja rele 1 yang hanya sebagai primer untuk mengamankan generator bekerja pada 0,354 detik saat timbul arus gangguan pada bus 2. Hal ini menunjukkan bahwa, metode yang diusulkan telah menghasilkan nilai perhitungan TDS yang akurat serta masih mematuhi aturan pengaturan minimum nilai *coordination time interval* (CTI) antara rele primer dan rele cadangan yaitu 0,2 detik dalam satu rating tegangan dan mendekati 0 di rating tegangan yang berbeda.

Daftar Rujukan

- [1] S. A. Raza, T. Mahmood, and S. B. A. Bukhari, "Optimum overcurrent relay coordination: A Review 37 The Nucleus A Quarterly Scientific Journal of Pakistan Atomic Energy Commission OPTIMUM OVERCURRENT RELAY COORDINATION: A REVIEW," 2014.
- [2] M. H. Hussain, S. R. A. Rahim, and I. Musirin, "Optimal overcurrent relay coordination: A review," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 332–336. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.043.
- [3] C. R. Chen, C. H. Lee, and C. J. Chang, "Optimal overcurrent relay coordination in power distribution system using a new approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 217–222, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.057.
- [4] M. Pujiantara *et al.*, "Perhitungan TDS Overcurrent Relay Menggunakan Adaptive Modified Firefly Algorithm".
- [5] N. Rezaei, M. N. Uddin, I. K. Amin, M. L. Othman, and M. Marsadek, "Genetic Algorithm-Based Optimization of Overcurrent Relay Coordination for Improved Protection of DFIG Operated Wind Farms," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2019, pp. 5727–5736. doi: 10.1109/TIA.2019.2939244.
- [6] S. N. Langazane and A. K. Saha, "Effects of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm Control Parameters on Overcurrent Relay Selectivity and Speed," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4550–4567, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140679.
- [7] A. Tjahjono *et al.*, "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2575–2585, Jul. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1563.
- [8] A. Korashi, S. Kamei, A. R. Youssef, and F. Jurado, "Solving Optimal Coordination of Direction Overcurrent Relays Problem Using Grey Wolf Optimization (GWO) Algorithm," *Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo University, Egypt, 2018.
- [9] S. Saremi, S. Mirjalili, and A. Lewis, "Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application," *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30–47, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.01.004.
- [10] N. Belbachir, M. Zellagui, S. Settoul, and C. Z. El-Bayeh, "Multi-Objective Optimal Renewable Distributed Generator Integration in Distribution Systems Using Grasshopper optimization Algorithm Considering Overcurrent Relay Indices," in *Proceedings of 2021 9th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/MPS52805.2021.9492567.
- [11] F. Abidin, M. Pujiantara, and D. F. U. Putra, "Optimasi Total Operating Time Relay Arus Lebih dengan Pertimbangan Konfigurasi Mesh, Open-Mesh, dan Radial Menggunakan Firefly Algorithm," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, pp. B53–B58, 2020.
- [12] C. S. Mardegan and R. Rifaat, "Considerations in Applying IEEE Recommended Practice for Protection Coordination in Industrial and Commercial Power Systems-Part i," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 5, pp. 3705–3713, Sep. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2563405.
- [13] V. R. Mahindara, D. F. C. Rodriguez, M. Pujiantara, A. Priyadi, M. H. Purnomo, and E. Muljadi, "Practical Challenges of Inverse and Definite-Time Overcurrent Protection Coordination in Modern Industrial and Commercial Power Distribution System," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 57, no. 1, pp. 187–197, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3030564.
- [14] L. Abualigah and A. Diabat, "A comprehensive survey of the Grasshopper optimization algorithm: results, variants, and applications," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 19. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 15533–15556, Oct. 01, 2020. doi: 10.1007/s00521-020-04789-8.
- [15] A. Ziadeh, L. Abualigah, M. A. Elaziz, C. B. Şahin, A. A. Almazroi, and M. Omari, "Augmented grasshopper optimization algorithm by differential evolution: a power scheduling application in smart homes," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, no. 21–23, pp. 31569–31597, Sep. 2021, doi: 10.1007/s11042-021-11099-1.
- [16] D. K. Lal, A. K. Barisal, and M. Tripathy, "Load Frequency Control of Multi Area Interconnected Microgrid Power System using Grasshopper Optimization Algorithm Optimized Fuzzy PID Controller," *Recent Advances on Engineering, Technology and Computational Sciences*, 2018.
- [17] A. Alhejji, M. Ebeed Hussein, S. Kamel, and S. Alyami, "Optimal Power Flow Solution with an Embedded Center-Node Unified Power Flow Controller Using an Adaptive Grasshopper Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119020–119037, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993762.
- [18] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, M. M. Rasid, N. H. Mirjat, Z. H. Leghari, and M. Salman Saeed, "Optimal voltage and frequency control of an islanded microgrid using grasshopper optimization algorithm," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113191.
- [19] A. L. Bukar, C. W. Tan, L. K. Yiew, R. Ayop, and W. S. Tan, "A rule-based energy management scheme for long-term optimal capacity planning of grid-independent microgrid optimized by multi-objective grasshopper optimization algorithm," *Energy Convers Manag*, vol. 221, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113161.