

Analisa Kinerja Relay Differensial pada Gardu Induk Surabaya Selatan Sebagai Sistem Proteksi dari Gangguan Arus Hubung Singkat Transformator Menggunakan Metode Algoritma Genetik

Misbahul Munir*, Nasyith Hananur Rohiem, Wahyu Setyo Pambudi, Novian Patria Uman Putra, Echwan Mulyana

Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Indonesia

Email: ^{1*}munir@itats.ac.id, ²nasyithhananur@itats.ac.id, ³wahyusp@itats.ac.id, ⁴echwanmulyana48@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: munir@itats.ac.id

Abstrak—Gangguan transformator Gardu Induk Surabaya Selatan salah satunya adalah hubung singkat, gangguan ini menyebabkan naiknya aliran arus listrik menjadi besar sehingga mengakibatkan panas pada saluran transmisi dan merusak peralatan sistem tenaga listrik sehingga perlu dilakukan proteksi. Jenis peralatan yang perlu untuk dilakukan proteksi salah satunya merupakan transformator dengan menggunakan rele diferensial. Pada penelitian digunakan proses penentuan setting rele menggunakan proses numerikal dan dikomparasi dengan algoritma genetika (AG). Pada proses AG nilai optimasi yang ditargetkan merupakan nilai arus I_{sett} dan I_d . Hasil dari kedua proses tersebut dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengetahui percepatan respon trip rele yang dihasilkan. Percepatan respon trip dari masing masing rele diferensial dari hasil AG menunjukkan nilai percepatan sebesar 0.088s, 0.047s dan 0.047s terhadap kondisi eksisting sedangkan proses numerikal menunjukkan percepatan proses trip sebesar 0.083s, 0.045s dan 0.045s terhadap kondisi eksisting. Hasil optimasi AG menunjukkan respon percepatan paling baik dari pada proses numerikal.

Kata Kunci: Hubung Singkat; Transformator; Rele Diferensial; Proses Numerikal; Algoritma Genetika.

Abstract—One of the disturbances in the transformer at the South Surabaya Substation is a short circuit, this disturbance causes an increase in the flow of electric current to a large extent resulting in heat on the transmission line and damage to the electric power system equipment so protection is needed. One type of equipment that needs to be protected is a transformer using a differential relay. In this study, the process of determining the relay settings was used using a numerical process and compared with the genetic algorithm (AG) method. In the AG process, the targeted optimization values are the current values of I_{sett} and I_d . The results of the two processes are compared with the existing conditions to determine the resulting acceleration of the trip relay response. The trip response acceleration of each differential relay from the AG results shows an acceleration value of 0.088s, 0.047s, and 0.047s to the existing conditions while the numerical process shows an acceleration of the trip process of 0.083s, 0.045s, and 0.045s to the existing conditions. The results of the AG optimization show that the acceleration response is the best compared to the numerical process.

Keywords: Short Circuit; Transformer; Differential Relay; Numerical Process; Genetic Algorithm.

1. PENDAHULUAN

Gangguan hubung singkat merupakan fenomena yang terjadi karena adanya gangguan dari sistem jaringan kelistrikan sistem tenaga listrik (STL)[1]. Salah satu jenis hubung singkat adalah hubung singkat, apabila terjadi gangguan hubung singkat akan mengakibatkan meningkatnya aliran arus listrik pada STL dari nilai nominal yang seharusnya[1]. Pada bagian yang mengalami hubung singkat akan mengalami lonjakan arus yang sangat tinggi, sehingga area dibawah dan diatas bagian yang terganggu akan mengalami penurunan arus sistem. Kondisi ini mengakibatkan panas terutama pada node yang mengalami gangguan, sehingga dibutuhkan sistem proteksi untuk mencegah arus berlebih yang terjadi pada sistem dikarenakan gangguan hubung singkat. Proteksi merupakan sistem perlindungan pada peralatan jaringan STL yang berguna untuk melindungi peralatan dari gangguan dan kerusakan serta untuk menjaga agar stabilitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga. Jenis peralatan yang dilakukan proteksi meliputi transformator, saluran dan sumber AC/DC. Transformator menjadi salah 1 komponen penting dalam penyaluran energi pada STL, salah 1 jenis peralatan proteksi berjenis rele[2], [3] merupakan perangkat pengaman utama pada transformator. Jenis rele diferensial[2], [4] merupakan rele yang banyak digunakan pada transformer dan juga dapat bekerja tanpa berkordinasi dengan rele yang lain untuk mengamankan transformator dari adanya gangguan[5][6].

Pemasangan rele diferensial perlu dilakukan proses *setting* untuk menemukan nilai setting yang sesuai agar respon. Prinsip kerja operasi rele diferensial dibantu oleh 2 buah transformator arus (CT) dari sisi primer dan sekunder. Dari ke 2 CT tersebut akan mengirimkan besaran nilai arus yang kemudian akan dibandingkan untuk menentukan kondisi dari system. Kondisi tersebut dibagi menjadi beberapa kondisi, yaitu rele diferensial dalam keadaan normal, dalam gangguan di luar daerah proteksi dan di dalam proteksi atau *internal fault*. Pada kondisi *internal fault* rele akan memerintahkan *circuit breaker* (CB) untuk memutus daya. Proses setting rele diferensial membutuhkan beberapa parameter masukan seperti arus diferensial dan arus *restrain* (penahan), dari 2 parameter tersebut nantinya akan digunakan untuk menentukan target luaran nilai *slope* (batas ambang kemampuan kumparan penahan) dan arus setting pada setting rele diferensial.

Beberapa penelitian menggunakan metode optimasi, kecerdasan buatan dan juga numerik untuk menyelesaikan persoalan pemilihan setting rele, khususnya rele diferensial. Pada[7]–[14]yang menggunakan metode optimisasi menunjukkan hasil dengan akurasi yang lebih baik. Pada perhitungan numerikal. Sedangkan pada[15], [16] menggunakan kecerdasan buatan yang dilatihkan dari hasil proses optimasi, sehingga kondisi ini dapat memberikan hasil yang lebih cepat dari pada menggunakan metode optimasi. Berdasarkan kondisi tersebut metode optimasi terbukti dapat melakukan

optimasi pada system proteksi dan mampu memberikan hasil yang baik, hanya saja metode optimasi memiliki kelemahan yaitu waktu eksekusi yang cukup lama dikarenakan untuk menemukan titik optimum dibutuhkan beberapa kali iterasi. Metode algoritma genetik (AG)[7], [10]–[14], [17] merupakan salah 1 jenis metode optimasi dan diimplementasikan untuk menentukan setting rele diferensial pada penelitian ini.

AG [7], [10]–[14], [17] merupakan algoritma heuristik adaptif yang terinspirasi dari proses seleksi alam yang dikenal sebagai proses evolusi dan dalam proses evolusinya, individu secara berkelanjutan akan mengalami perubahan gen. Individu individu tersebut muncul dan mendapatkan perubahan gen dikarenakan terdapat proses perkembangan-biakan yang dilakukan oleh individu individu yang mampu beradaptasi dan bertahan hidup pada lingkungannya. Jika didalami secara singkat, AG mensimulasikan kondisi kelangsungan hidup dari individu terkuat dari generasi individu yang turun temurun untuk menyelesaikan sebuah permasalahan optimasi. Algoritma ini pertama kali dikembangkan [7], [10]–[14], [17] oleh John Holland pada tahun 1970-an di New York, Amerika Serikat yang kemudian dikembangkan Kembali oleh muridnya David Goldberg.

Penelitian terkait dengan metode AG telah banyak digunakan umumnya pada bidang sistem tenaga[10], [17] dan khususnya proteksi[7], [11]–[14], metode AG mampu menunjukkan hasil yang baik. Dapat menemukan nilai optimal dengan baik, sehingga nilai objektif yang ditargetkan dari masing masing objek yang diteliti dpt diperoleh nilai yang optimum. Dari kondisi ini yang menjadikan metode AG dipilih untuk diimplementasikan pada penentuan nilai setting pada rele diferensial yang pada penelitian yang lain diimplementasikan untuk penentuan setting nilai rele arus lebih[11]–[13] pada kondisi kordinasi rele proteksi.

Setting rele dilakukan dengan membandingkan antara perhitungan numerikal dan menggunakan algoritma genetik untuk mengetahui performa dari hasil metode optimasi serta respon yang diberikan oleh rele diferensial memerintahkan CB untuk memutuskan tegangan saat gangguan terjadi [18][19]. Rele yang digunakan merupakan rele yang terdapat pada gardu induk (GI) area Surabaya selatan yang masing masing terpasang pada trafo 1, 2 dan 3. Metode AG pada penelitian ini diselesaikan dengan menggunakan perangkat lunak matlab. Perangkat lunak Matlab dipilih karena menyediakan beberapa fungsi dasar dalam sebuah operasi numerikal yang praktis khususnya dalam implementasi algoritma genetik[20][21][22]. Hasil penentuan setting rele diferensial pada penelitian ini yang menggunakan operasi numerikal dan AG selanjutnya akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk mengetahui respon sistem proteksi dari gangguan arus hubung singkat yang terjadi pada transformator.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Sistem Proteksi

Sistem proteksi merupakan sistem keamanan pada STL yang berguna untuk mengamankan peralatan dan memutus jalur gangguan sehingga tidak sampai mengganggu pada area yang lain. Pemutusan saluran yang terganggu didasari oleh beberapa parameter yang diidentifikasi berdasarkan kondisi yang berada di lapangan, seperti nilai tegangan, nilai arus, nilai frekuensi, daya, sudut fasa, impedansi saluran dll. Target penggunaan sistem proteksi antara lain untuk mereduksi kerusakan peralatan dikarenakan gangguan pada STL, melakukan isolasi terhadap area yang terganggu sehingga tidak sampai mengganggu pada area lain serta meningkatkan reliabilitas sistem pada STL.

2.2 Formulasi Setting Rele Differensial

Formulasi untuk menyelesaikan persoalan *setting* rele, khususnya rele differensial, diperlukan beberapa tahapan penyelesaian variabel *setting* yang harus diketahui. Variabel tersebut terkait[1]–[4], [15] rasio *current transformer* (CT), eror rasio CT dengan berdasarkan SPLN 52:1 1983, arus sekunder CT, arus diferensial, arus *restrain*, prosentase slope, dan arus setting. Untuk mengetahui nilai dari variable tersebut dapat dilakukan seperti pada tahapan tahapan berikut.

a. Menghitung arus rating

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui nilai rasio CT yang nantinya nilai rasio yang terdekat dengan arus rating akan dipilih. Setelah didapatkan rasio CT nantinya nilai akan digunakan dalam mengetahui error Mismatch. Arus rating digunakan untuk perhitungan dalam memperoleh nilai rasio CT, persamaan (1)-(2) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung arus rating :

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (1)$$

$$I_{rating} = 110\% \times I_n \quad (2)$$

Dimana : I_n merupakan nilai arus nominal (A), S merupakan daya (MVA), V merupakan tegangan pada sisi primer dan sekunder transformator.

b. Menghitung *error Rasio_{CT}*

error Rasio_{CT} diambil dari sebuah hasil dari CT yang dipilih atau CT yang dipergunakan dan rasio CT_{ideal} yang berasal dari pabrikan dengan cara membandingkan. Aturan S-PLN, nilai *error Rasio_{CT}* tidak diperbolehkan melebihi 5%, supaya sistem kelistrikan optimal serta menjaga adanya gangguan, persamaan (3)-(4) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung *error Rasio_{CT}*.

$$error\ Rasio_{CT} (\%) = \frac{CT_{Ideal}}{CT_{terpasang}} \quad (3)$$

$$CT_{Ideal} = \frac{CT_2}{CT_1} \times \frac{V_1}{V_2} \quad (4)$$

Dimana : CT_{Ideal} merupakan nilai ideal CT, $CT_{terpasang}$ merupakan CT eksisting yang ada dilapangan, V_1 merupakan tegangan pada sisi primer dan V_2 merupakan tegangan pada sisi sekunder.

c. Menghitung arus sekunder CT

Arus yang terbaca oleh transformator arus merupakan arus sekunder CT (I_s), persamaan dalam mencari arus sekunder CT, persamaan (5) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung arus sekunder CT.

$$i_n = I_s = \frac{5}{rasio\ CT} \times I_n \quad (5)$$

d. Menghitung arus diferensial

Arus diferensial merupakan sebuah arus yang berasal dari selisih arus dari sisi tegangan tinggi dengan tegangan rendah. Persamaan (6) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung arus diferensial (I_d) dengan i_2 merupakan arus yang melewati CT_2 dan i_1 merupakan arus yang melewati CT_1 .

$$I_d = |i_2 - i_1| \quad (6)$$

Jika $I_d \neq 0$, maka relay diferensial akan memberikan sinyal trip kepada CB (*circuit breaker*) untuk melakukan pemutusan saluran

e. Menghitung arus restrain

Arus restrain (I_r) merupakan arus yang digunakan sebagai penahan pada parameter kerja relay diferensial. Arus ini untuk mengetahui arus rata-rata yang mengalir di sisi tegangan tinggi dan rendah pada transformator. Persamaan (7) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung arus restrain (I_r).

$$I_r = \frac{i_1 + i_2}{2} \quad (7)$$

f. Menghitung prosentase slope

Prosentase slope diperoleh dari membagi antara arus diferensial dengan arus restrain. $slope_1$ bekerja untuk mengetahui arus differensial sehingga dapat bekerja pada gangguan internal, $slope_2$ berfungsi saat ada gangguan eksternal agar tidak bekerja. Persamaan (8)-(9) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung prosentase slope :

$$slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (8)$$

$$slope_2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2\right) \times 100\% \quad (9)$$

g. Menghitung arus setting

Arus setting (I_{sett}) merupakan batas *threshold* pada rele diferensial. Rele diferensial akan bekerja untuk memberikan sinyal trip pada CB jika nilai pada arus differensial melebihi I_{sett} . Persamaan (10) berikut ini merupakan persamaan dalam menghitung I_{sett} :

$$I_{sett} = slope_1 \times I_r \quad (10)$$

2.3 Formulasi Algoritma Genetik (AG)

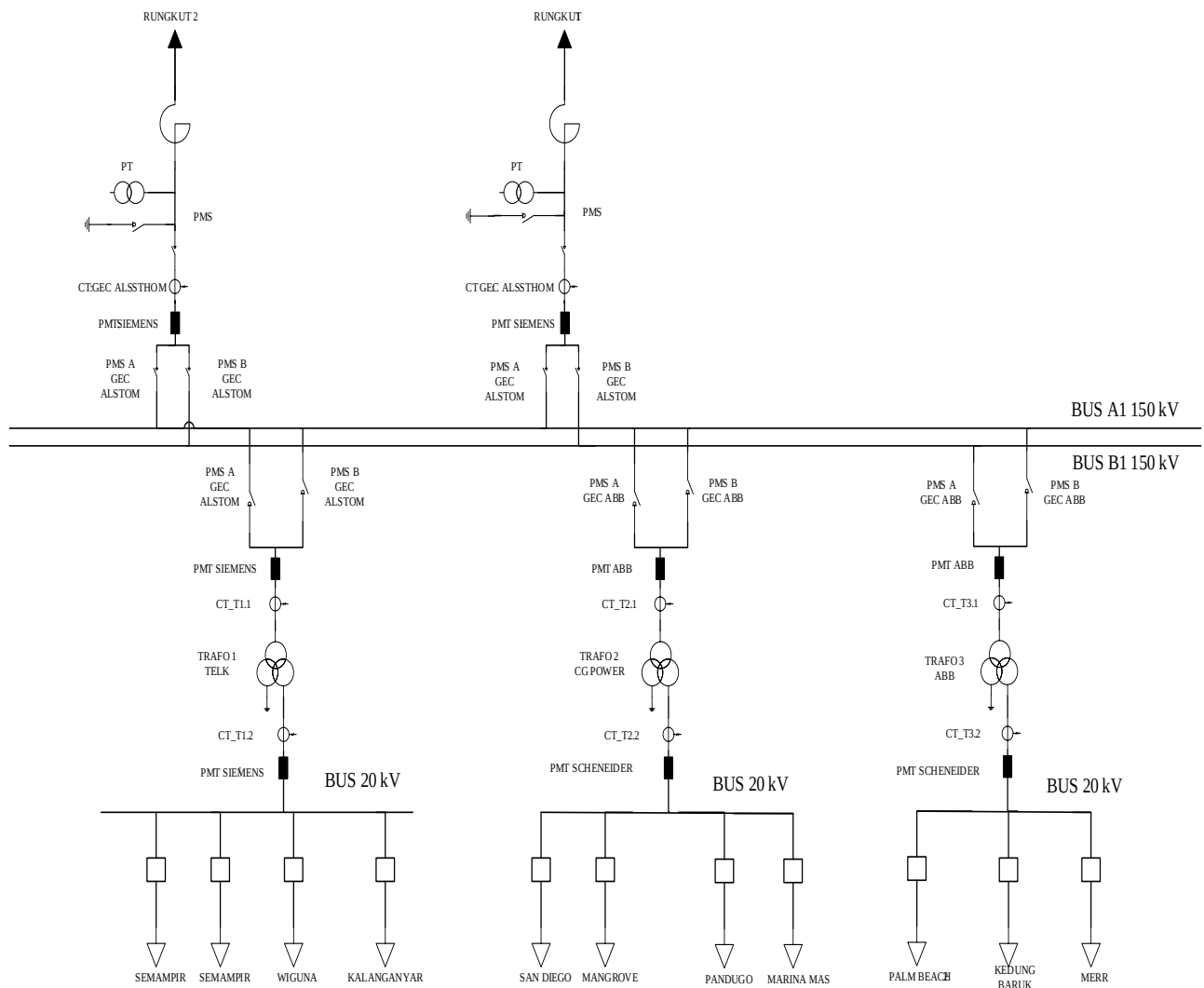
Formulasi AG [10], [11], [13] diselesaikan berdasarkan teori evolusi yang dimulai dari penentuan populasi awal dan posisi individual terbaik berdasarkan persamaan objektif sebagai solusi pada iterasi awal, dilanjut dengan iterasi ke berikutnya. Pada setiap iterasi berikutnya dilakukan penentuan kromosom baru atau disebut *parents* untuk mengenerate individual baru menggunakan fungsi perkawinan silang (*crossover*) dari kromosom baru yang telah terpilih kemudian dilanjut dengan proses mutasi [10], [11], [13]. Kromosom baru dipilih berdasarkan nilai objektif yang terbaik yang dihasilkan oleh individu [10], [11], [13]. Proses ini akan terus berlanjut hingga kondisi konvergen dapat dicapai atau sampai batas iterasi yang telah ditentukan.

Berdasarkan penjelasan diatas maka pada gambar merupakan diagram alir dari formulasi AG yang pada penelitian ini diselesaikan dengan perangkat lunak matlab yang kemudian diimpelentasikan pada perangkat lunak ETAP untuk mengetahui performasi dari AG.

2.4 Formulasi penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data *single line diagram* (SLD) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1, 3 jenis transformer sebagai objek yang dilakukan pengamanan menggunakan rele diferensial beserta spesifikasi rele

diferensial yang digunakan pada gardu induk (GI) Surabaya selatan seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 - 2. Dari data tersebut selanjutnya akan dilakukan proses numerikal untuk mengetahui nilai *setting* rele diferensial menggunakan persamaan 1-10. Setelah proses numerikal kemudian dilakukan proses optimasi menggunakan AG.



Gambar 1. SLD substation Surabaya

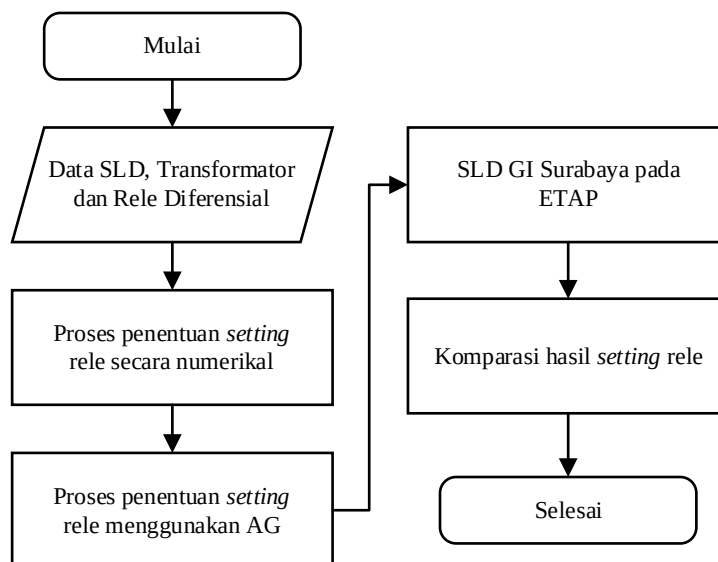
Tabel 1. Data transformator GI

Merk	Vektor Grup	Arus	Tegangan Kerja	Daya	Impedansi
TELK	Ynyn0+d	231/1732 A	150/20 KV	60 MVA	12,46%
CG POWER	Ynyn0+d	230,9/1732 A	150/20 KV	60 MVA	12178%
ABB	Ynyn0+d	230,9/1574,6 A	150/22 KV	60 MVA	12,05%

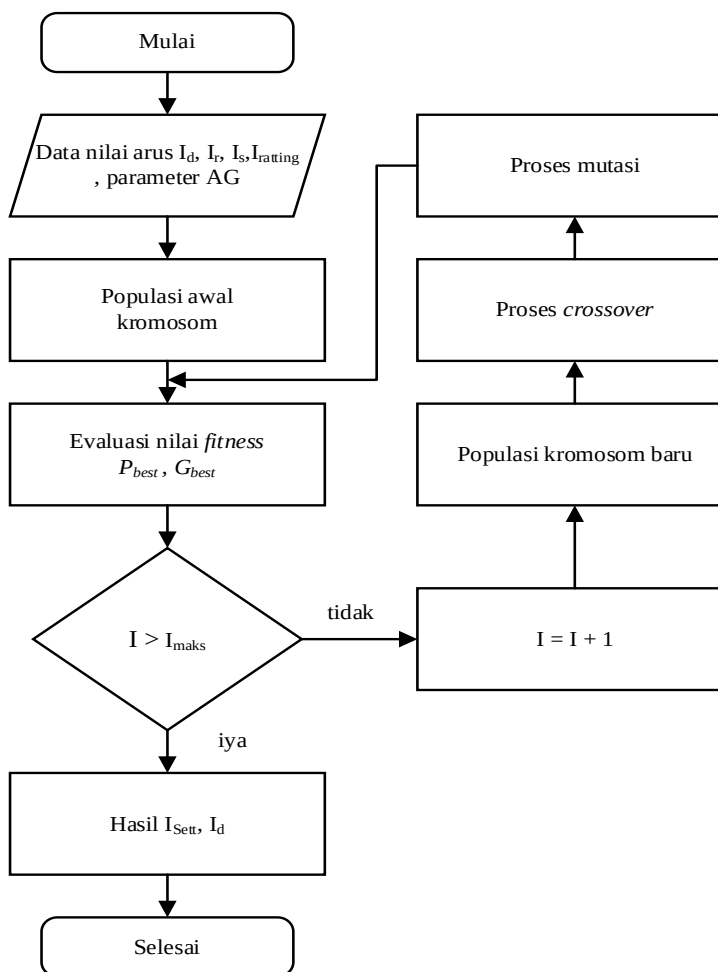
Tabel 2. Data spesifikasi rele diferensial

Merk	Type	Arus Nominal	Rasio		Slope1	Slope2
AREVA	P643	5 A	$CT_p = 80/5$ A	$CT_s = 400/5$ A	30%	80%
AREVA	PCS 9671	5 A	$CT_p = 300/5$ A	$CT_s = 2000/5$ A	30%	80%
ABB	RET 670	5 A	$CT_p = 300/5$ A	$CT_s = 2000/5$ A	30%	80%

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak matlab sebagai penentu nilai optimal *setting* rele menggunakan AG yang kemudian diimplementasikan pada perangkat lunak ETAP begitu juga dengan hasil proses numerikal. Implementasi pada ETAP ditujukan untuk mengetahui komparasi performa rele diferensial dari hasil optimasi menggunakan AG dengan proses numerikal. Pada gambar 2 merupakan diagram alir yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini serta gambar 3 merupakan diagram alir AG yang diimplementasikan pada penentuan *setting* nilai rele diferensial.



Gambar 2. Diagram alir penelitian



Gambar 3. Diagram alir AG

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komparasi hasil pada penelitian ini akan dilakukan dengan melakukan komparasi dari hasil proses numerikal dengan AG. Komparasi meliputi hasil nilai arus I_{sett} dan I_d dari transformator 1, 2, dan 3 kemudian dilakukan uji respon waktu trip dari masing masing rele diferensial.

3.1 Penentuan nilai *setting* rele diferensial menggunakan proses numerikal

Proses perhitungan nilai *setting* rele untuk menentukan nilai arus I_{sett} dan I_d dari transformator 1, 2, dan 3 dengan cara numerikal pada penelitian ini dilakukan dengan tahap tahap seperti yang sudah dijelaskan pada subab 2.2. Pada tabel 3.3 berikut merupakan hasil proses numerikal yang telah dilakukan.

Tabel 3. Hasil proses numerikal penentuan nilai arus I_{sett} dan I_d pada transformer 1,2 dan 3

Merk	TELK		CG POWER		ABB	
S (MVA)	60		60		60	
	Primer	Sekunder	Primer	Sekunder	Primer	Sekunder
V (kV)	150	20	150	20	150	22
CT (A)	80	400	300	2000	300	2000
	5	5	5	5	5	5
Nilai	CT _p	CT _s	CT _p	CT _s	CT _p	CT _s
I _n (A)	230.9401	1732.0508	230.9401	1732.0508	230.9401	1574.5916
I _{rating} (A)	254.0341	1905.2559	254.0341	1905.2559	254.0341	1732.0508
CT _{ideal} (A)	10.6667	120.0000	53.3333	450.0000	58.6667	409.0909
Error (%)	0.1333	0.3000	0.1778	0.2250	0.1956	0.2045
Is (A)	14.4338	21.6506	3.8490	4.3301	3.8490	3.9365
I _d	7.2169		0.4811		0.0875	
I _r	18.0422		4.0896		3.8927	
Slope ₁	40		11.7647		2.2472	
Slope ₂	80		23.5294		4.4944	
I _{set}	7.2169		0.4811		0.0875	

Pada transformer 1 didapatkan hasil nilai arus I_{sett} dan I_d sebesar 7.2169 A, sedangkan pada tranformator 2 dan 3 sebesar 0.4811 A dan 0.0875 A. Berdasarkan kondisi tersebut jika terdapat perbedaan arus yang melebihi arus *setting* maka rele akan memberikan sinyal trip pada CB. Nilai prosentase eror yang didapatkan juga telah memenuhi SPLN yaitu tidak melebihi 5% pada CT yang di sisi primer dan sekunder dari transformator 1, 2 dan 3.

3.2 Penentuan nilai *setting* rele diferensial menggunakan AG

Penentuan nilai *setting* rele menggunakan AG ditujukan untuk menemukan nilai *setting* optimal untuk rele diferensial. Pada tabel 4 merupakan parameter AG yang digunakan pada penelitian ini. Penentuan nilai *setting* pada masing masing transformator memiliki nilai iterasi maksimum yang sama yaitu 100. Pada tabel 5 merupakan hasil nilai arus I_{sett} dan I_d hasil dari AG yang digunakan pada penelitian ini. Hasil nilai arus I_{sett} dan I_d dari AG menunjukkan nilai sedikit rendah dibawah nilai proses numerikal.

Tabel 4. Parameter AG

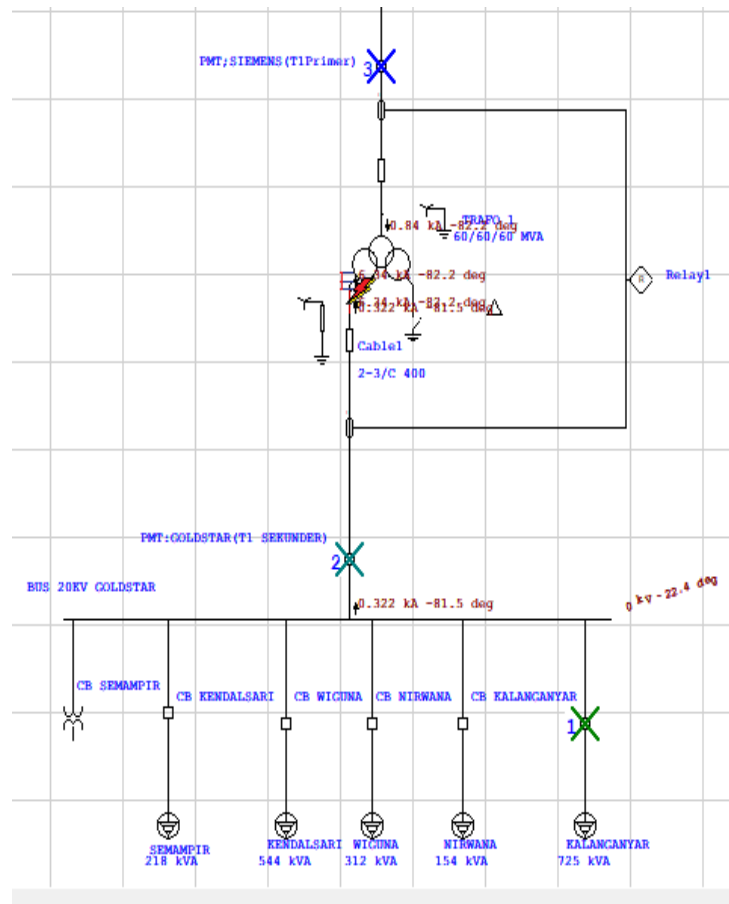
Parameter	Nilai
Maksimum iterasi	100
Jumlah populasi	20
Panjang kromosom	16
Maksimum regenerasi	20
Selection rate	0.8
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.2

Tabel 5. Hasil nilai arus I_{sett} dan I_d dari AG

Merk	TELK	CG POWER	ABB
I _d	7.2159	0.4711	0.0855
I _{set}	7.2159	0.4711	0.0855

3.3 Komparasi rele *setting* menggunakan proses numerikal dan AG

Komparasi rele *setting* pada bagian ditunjukkan berdasarkan respon waktu trip yang paling cepat yang diukur menggunakan simulasi pada ETAP berdasarkan hasil *setting* rele diferensial yang dihasilkan oleh proses numerikan dan AG. Pada simulasi ETAP akan dilakukan pengujian gangguan arus yang menyebabkan rele bekerja dan memerintahkan sinyal trip ke CB. Gambar 4 merupakan proses pengujian gangguan arus pada simulasi ETAP. Gangguan diberikan dari bus area dibawah sisi sekunder transformator 1,2 dan 3. Pada tabel 6 merupakan hasil waktu trip yang ditunjukkan oleh masing rele diferensial pada masing masing transformator.



Gambar 4. Proses uji trip pada ETAP

Tabel 6. komparasi waktu trip rele diferensial

Data	Waktu trip (s)		
	Rele 1	Rele 2	Rele 3
Proses Numerikal	0.094	0.133	0.133
AG	0.089	0.031	0.031
Eksisting	0.177	0.178	0.178

Hasil waktu trip menunjukkan perbedaan dari proses numerikal, AG dan data waktu trip eksisting. Nilai waktu trip dari AG menunjukkan percepatan respon trip dari masing masing rele diferensial yang terpasang pada transformator 1,2 dan 3 sebesar 0.088s, 0.047s dan 0.047s terhadap kondisi eksisting sedangkan proses numerikal menunjukkan percepatan proses trip sebesar 0.083s, 0.045s dan 0.045s. Hal ini menunjukkan bahwa AG dapat melakukan proses optimasi nilai *setting* arus I_{sett} dan I_d sehingga diperoleh waktu trip yang lebih cepat dari proses numerikal dan utamanya pada kondisi eksisting.

4. KESIMPULAN

Dari percobaan dan analisa yang sudah dilakukan pada *setting* rele diferensial transformator 1, 2, dan 3 yang dilakukan dengan proses numerikal dan AG menunjukkan nilai waktu trip yang baik dari kondisi eksisting. Percepatan respon trip dari masing masing rele diferensial dari hasil AG menunjukkan nilai percepatan sebesar 0.088s, 0.047s dan 0.047s terhadap kondisi eksisting sedangkan proses numerikal menunjukkan percepatan proses trip sebesar 0.083s, 0.045s dan 0.045s terhadap kondisi eksisting. Hasil optimasi AG menunjukkan respon percepatan paling baik dari pada proses numerikal. Berdasarkan kondisi tersebut diketahui bahwa AG mampu melakukan optimasi pada penentuan nilai *setting* rele diferensial.

REFERENCES

- [1] J. Ciufu and A. Cooperberg, Power System Protection: Fundamentals and Applications. 2021. doi: 10.1002/9781119847397.
- [2] V. Gurevich, "Differential Relays," in Electric Relays, 2021. doi: 10.1201/9781315221168-20.
- [3] "CT Performance in Differential Relay Circuits," 2005. doi: 10.1201/9781420030488.axb.
- [4] I. P. de Siqueira, "Protection and Automation," 2020. doi: 10.1007/978-3-030-44484-6_9.

- [5] S. T. Elektro, F. Teknik, U. N. Surabaya, U. T. Kartini, and D. Ph, "PEMODELAN BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK PADA RELAY DIFFERENSIAL TRANSFORMATOR GI BABADAN 150 KV Eka Prasetyo Hidayat," pp. 323–331, 2018.
- [6] D. Hariyono, "Analisa Proteksi Relay Differensial Terhadap Gangguan Eksternal Transformator," *Saintek ITM*, vol. 32, no. 2, pp. 37–43, 2019, doi: 10.37369/si.v32i2.60.
- [7] M. H. Costa, R. R. Saldanha, M. G. Ravetti, and E. G. Carrano, "Robust coordination of directional overcurrent relays using a matheuristic algorithm," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 2, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1010.
- [8] Z. S. Rahmania, L. Syafa'ah, I. Pakaya, and Zulfatman, "Optimization of overcurrent relay coordination using cuckoo search algorithm in electronic induction systems," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/674/1/012037.
- [9] D. Suhardi, I. Pakaya, R. Putra, and A. Faruq, "Coordination analysis of protection relay settings utilizing particle swarm optimization method," in *AIP Conference Proceedings*, 2022. doi: 10.1063/5.0094251.
- [10] V. S. Bisht, N. Joshi, G. S. Jethi, and A. S. Bhakuni, "A review on genetic algorithm and its application in power system engineering," in *Studies in Computational Intelligence*, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-7571-6_5.
- [11] P. Dolezel, F. Holik, J. Merta, and D. Stursa, "Optimization of a Depiction Procedure for an Artificial Intelligence-Based Network Protection System Using a Genetic Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 5, 2021, doi: 10.3390/app11052012.
- [12] D. Garcia, A. E. Lugo, E. Hemberg, and U. M. O'Reilly, "Investigating coevolutionary archive based genetic algorithms on cyber defense networks," in *GECCO 2017 - Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 2017. doi: 10.1145/3067695.3076081.
- [13] 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*, 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2939244.
- [14] D. Acharya and D. K. Das, "An efficient optimizer for optimal overcurrent relay coordination in power distribution system," *Expert Syst Appl*, vol. 199, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116858.
- [15] M. Bakkar, S. Bogarra, F. Córcoles, A. Aboelhassan, S. Wang, and J. Iglesias, "Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 13, 2022, doi: 10.3390/en15134933.
- [16] R. S. Jawad and H. Abid, "Fault Detection in HVDC System with Gray Wolf Optimization Algorithm Based on Artificial Neural Network," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 20, 2022, doi: 10.3390/en15207775.
- [17] X. Lü et al., "Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 205, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112474.
- [18] N. U. Maharani1, A. Trihasto, and Deria Pravitasari, "Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih dan Rele Diferensial pada Generator Kapasitas 100 Mw.," *Theta Omega: Journal of Electrical Engineering, Computer and Information Technology* 2.1, pp. 44–49, 2021.
- [19] M. Munir, N. Patria, U. Putra, W. S. Pambudi, N. H. Rohiem, and I. Nur, "BEES : Bulletin of Electrical and Electronics Engineering Analisa Koordinasi Proteksi Relay Jarak Dengan Software Digsilent Pada Gi Sukolilo Ke Gi Kenjeran Menggunakan Metode Fuzzy," vol. 3, no. 1, pp. 14–22, 2022.
- [20] M. T. Ibnu Maulana Siddiq, Drs. Daryanto, M.T., Massus Subekti, S.Pd., "Simulasi Setting Directional Overcurrent Relay (Docr) Menggunakan Algoritma Genetik," [Http://Repository.Unj.Ac.Id/](http://Repository.Unj.Ac.Id/), 2546.
- [21] M. R. Zhuliansya, M. Munir, J. T. Industri, I. Teknologi, and A. Tama, "Resetting Sistem Proteksi pada Sistem Kelistrikan PT . Sasa Inti – Gending Plant," pp. 1–8.
- [22] Wahyu Hendra Prasetya, Misbahul Munir, N. P. U. Putra, Nasyith, H. Rohiem, and I. Masfufiah, "Analisa Koordinasi Proteksi Over Current Relay Pada Gardu Induk Bangil," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, vol. 10, no. 2, pp. 1–15, 2018.