

Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* pada Trafo 60 MVA 150/20 kV dan Penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran Berbasis *Particle Swarm Optimization*

Yulia Setyaningrum

Suprihadi Prasetyono

Andi Setiawan

yuliasetyaningrum25@gmail.com
Universitas Jember

shabri_prasetyo@yahoo.com
Universitas Jember

andismt@gmail.com
Universitas Jember

Abstrak

Pada Gardu Induk Banaran Trafo 60 MVA 150/20 kV permasalahan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat terkadang menyebabkan Penyulang Gumul 20 kV mengalami pemadaman, sehingga pengaman *incoming* trafo 60 MVA juga terkena gangguan. Hal tersebut dikarenakan koordinasi rele antara OCR penyulang Gumul 20 kV dengan OCR *incoming* trafo 60 MVA yang kurang selektif dalam mengisolasi gangguan yang menyebabkan antar rele tidak *overlapping* (tidak tumpang tindih). Oleh karena itu untuk meningkatkan kinerja koordinasi OCR perlu dilakukan *setting* OCR yang optimal dengan menggunakan metode PSO. Hasil penelitian ini menunjukkan nilai *setting* OCR di sisi penyulang menggunakan PSO menghasilkan TMS sebesar 0.1197 s dengan waktu operasi rele lebih cepat sebesar 0.2471 s daripada hasil konvensional diperoleh TMS sebesar 0.1453 s dengan waktu operasi rele sebesar 0.300 s. Sehingga hasil PSO tersebut menghasilkan CTI yang semakin meningkat sebesar 0.3529 s, sedangkan hasil dari metode konvensional diperoleh CTI sebesar 0.300 s. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa koordinasi rele antara OCR Penyulang Gumul 20 kV dengan OCR *incoming* trafo 60 MVA dapat bekerja cukup selektif dengan mengisolasi gangguan secara tepat.

Kata Kunci — Hubung Singkat, Koordinasi, OCR, PSO, TMS

Abstract

At Banaran Transformer Substation 60 MVA 150/20 kV, the problem that often occurs is a short circuit fault. Short circuit fault sometimes causes the 20 kV Gumul Feeder to go out, so that the incoming safety of the 60 MVA transformer is also affected. This is because the coordination of the relay between the 20 kV Gumul feeder OCR and the 60 MVA incoming transformer OCR is less selective in isolating the disturbance which causes the relays not to overlap (not overlap). Therefore, to improve the performance of OCR coordination, it is necessary to set optimal OCR using the PSO method. The results of this study indicate the value of the OCR setting on the feeder side using PSO produces a TMS of 0.1197 s with a relay operating time of 0.2471 s faster than the conventional results obtained by a TMS of 0.1453 s with a relay operating time of 0.300 s. So that the results of the PSO resulted in an increasing CTI of 0.3529 s, while the results from the conventional method obtained a CTI of 0.300 s. Based on these

results it can be concluded that the coordination of the relay between the 20 kV Gumul Feeder OCR and the 60 MVA incoming transformer OCR can work quite selectively by isolating the disturbance appropriately.

Keywords — Coordination, Short Circuit, OCR, PSO, TMS

I. PENDAHULUAN

Sistem transmisi tenaga listrik adalah bagian terpenting dalam penyaluran tenaga listrik. Salah satu komponen penting pada sistem transmisi tenaga listrik adalah sistem proteksi yang berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan. Gangguan yang sering terjadi dalam penyaluran tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat. Agar gangguan tidak menyebar luas pada daerah yang masih normal maka diperlukan perlindungan berupa rele proteksi. Pada rele OCR (*Over Current Relay*) hanya mendeteksi gangguan hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa, sedangkan gangguan hubung singkat 1 fasa dideteksi oleh rele GFR (*Ground Fault Relay*). Perangkat proteksi yang diterapkan ke sistem tenaga listrik berupa koordinasi antara rele primer dan rele *back up*. Pada dasarnya rele primer diatur untuk beroperasi lebih cepat dengan bekerja terlebih dahulu jika terjadi gangguan. Rele *back up* mengambil alih saat rele primer gagal beroperasi pada saat ada gangguan. Koordinasi rele sangat mempertimbangkan CTI (*Coordination Time Interval*) agar rele dapat *trip* secara tepat/selektif ketika ada gangguan hubung singkat.

Pada Gardu Induk Banaran Trafo 60 MVA 150/20 kV permasalahan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat terkadang menyebabkan Penyulang Gumul 20 kV mengalami pemadaman, sehingga pengaman *incoming* trafo juga terkena gangguan. Hal tersebut dikarenakan koordinasi *over current relay* yang kurang selektif dalam mengisolasi gangguan yang menyebabkan antar rele tidak *overlapping* (tidak tumpang tindih). Padahal Gardu Induk Banaran trafo 60 MVA 150/20 kV tersebut memiliki peran sangat penting dalam penyaluran energi listrik ke jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV berguna untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Oleh karena itu perlu dilakukan *setting* OCR yang optimal upaya untuk

meningkatkan kinerja dari koordinasi OCR dari gangguan hubung singkat.

Ada beberapa penelitian menggunakan PSO sebagai teknik optimasi diantaranya “Simulasi Optimasi Daya Reaktif dan Tegangan pada Sistem Jamali 500 kV Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization*”, pada penelitian tersebut membuktikan bahwa hasil simulasi optimasi PSO daya reaktif dapat mengurangi rugi daya aktif [1]. Kelebihan utama algoritma PSO adalah mempunyai konsep sederhana, mudah diimplementasikan dan efisien dalam perhitungan. Teknik optimasi cerdas seperti yang dimiliki PSO dapat menyesuaikan pengaturan rele.

Maka penelitian ini membahas tentang optimasi koordinasi *over current relay* pada trafo 60 MVA 150/20 kV dan penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran dengan menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO). Diharapkan dengan menggunakan metode PSO ini dapat menghasilkan *setting* OCR yang optimal agar antar rele dapat terkoordinasi secara selektif.

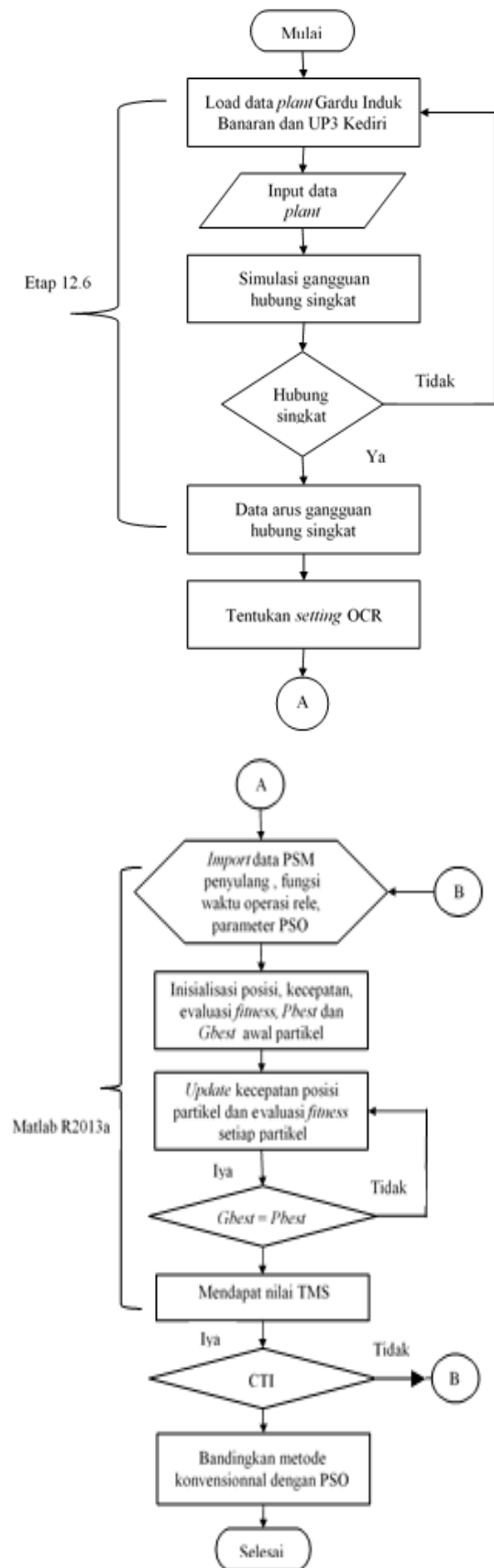
II. METODE PENELITIAN

Data diperoleh melalui observasi secara langsung untuk mendapatkan data yang sesuai dengan permasalahan pada penelitian ini. Digunakan data primer berupa *single line* diagram, spesifikasi trafo, spesifikasi rele dan data konduktor saluran (impedansi, panjang saluran). Pengumpulan data pada *single line* diagram transmisi, spesifikasi trafo dan rele diperoleh langsung di Gardu Induk Banaran ULTG Kediri, sedangkan *single line* diagram penghantar, data penyulang gumul berupa jenis kabel A3C dengan luas penampang 150 mm² dan panjang penyulang 41.537 km diperoleh di UP3 Kediri.

A. Diagram Alir Sistem

Dalam analisis data menggunakan simulasi *software* ETAP 12.6 untuk mensimulasikan gangguan hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa berdasarkan titik lokasi gangguan pada 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang Gumul yaitu 41.537 km. Setelah memperoleh arus gangguan hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa, kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari *setting* OCR pada TMS PSM di penyulang dan di *incoming* trafo. Setelah memperoleh *setting* rele dengan menggunakan metode konvensional, kemudian mencari nilai *setting* rele pada TMS penyulang menggunakan metode PSO. PSO menggunakan *software* MATLAB R2013a. Penjelasan lebih singkat mengenai diagram alir sistem dapat dilihat pada Gbr 1.

Pada tahap PSO memasukkan batasan parameter-parameter untuk mencari nilai yang paling optimum dari semua iterasi perhitungan. Variabel yang akan dioptimalkan adalah TMS penyulang untuk memperoleh waktu operasi rele yang minimum di sisi penyulang. Hasil optimasi dari PSO harus mempertimbangkan standar CTI *over current relay* berdasarkan IEEE 242-2001 pada umumnya berkisar antara 0.3-0.4 sekon [2]. Kemudian membandingkan hasil metode PSO dengan metode konvensional.



Gbr. 1 Diagram alir sistem

B. Prosedur Setting Over Current Relay

OCR (*Over Current Relay*) adalah rele arus lebih untuk mendeteksi gangguan hubung singkat fasa-fasa. Prinsip kerja OCR adalah rele akan bekerja bila arus gangguan yang mengalir melebihi nilai arus *setting* (*Iset*). Pada OCR terdapat dua parameter *setting* rele yaitu *setting* PSM dan *setting* waktu (TMS). Sedangkan arus *setting* (*Iset*) atau arus *pick up* (*Ip*) berfungsi sebagai arus maksimum untuk membatasi arus beban maksimum (IFLA) yang ada di peralatan. Menurut standar *British BS 142 - 1983* batas penyetelannya untuk arus *pick up* OCR adalah [3]:

$$1.05 \times IFLA < I_p < 1.3 \times IFLA \tag{1}$$

PSM (*Plug Setting Multiplier*) adalah *setting* terhadap arus gangguan dan arus *pick up* atau arus *setting* rele yang diatur sedemikian sehingga rele tidak beroperasi untuk arus beban maksimum (IFLA) tetapi beroperasi untuk arus gangguan hubung singkat minimum [4].

$$PSM = \frac{I_f}{I_{set}} \tag{2}$$

Dimana :

I_f = Arus gangguan hubung singkat (Ampere)

I_{set} = Arus *setting* rele (Ampere)

TMS (*Time Setting Multiplier*) berfungsi *setting* waktu sebagai penentu waktu operasi rele (t). Untuk menentukan TMS pada *setting* OCR dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$TMS = \frac{(PSM)^\gamma - 1}{\lambda} \times t \tag{3}$$

Dimana :

TMS = *Time Multiplier Setting*

t = Waktu operasi rele (s)

PSM = *Plug Setting Multiplier*

λ = Koefisien karakteristik waktu

γ = Koefisien karakteristik waktu

C. Prosedur Metode PSO

Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) didasarkan pada perilaku sosial sekawanan burung atau ikan. Seekor hewan dalam algoritma PSO akan dianggap sebagai partikel. Partikel ini akan dipengaruhi oleh perilaku individu hewan itu sendiri dan perilaku dari partikel lain dalam satu kelompok. Apabila satu partikel menemukan jalan yang tepat dan terpendek menuju ke suatu sumber makanan, maka yang terjadi adalah partikel-partikel lain tersebut akan mengikuti partikel yang telah menemukan jalan yang tepat dan terpendek tadi. Setiap partikel melakukan pencarian solusi yang optimum dengan melintasi ruang pencarian. Hal ini dilakukan dengan cara setiap partikel melakukan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari partikel tersebut (*local best*) dan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari seluruh kawanan (*global best*). Masing-masing partikel diberi fungsi objektif yang sesuai untuk menyelesaikan suatu permasalahan. Mekanisme *updating* status partikel sebagai berikut [5]:

$$V_i^{it+1} = w^{it} \cdot V_i^{it} + c_1 \cdot r \cdot (Pbest.i - X_i^{it}) + c_2 \cdot r \cdot (Gbest.i - X_i^{it}) \tag{4}$$

$$X_i^{it+1} = X_i^{it} + V_i^{it+1} \tag{5}$$

$$w^{it} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{in})it}{it_{max}} \tag{6}$$

Keterangan:

X_i^{it} : Posisi partikel ke-i, iterasi saat ini

V_i^{it} : Kecepatan partikel ke-i, iterasi saat ini

X_i^{it+1} : Posisi partikel ke-i, iterasi selanjutnya maka

V_i^{it+1} : Kecepatan partikel ke-i, iterasi selanjutnya maka

c_1 : Cognitive constant (*learning rate*)

c_2 : Social constant (*learning rate*)

r : Nilai random 0 sampai 1

Pbest : Posisi terbaik dari partikel ke-i maka

Gbest : Posisi terbaik dari seluruh populasi

w^{it} : Koefisien *inertia* iterasi saat ini

w_{max} : Koefisien *inertia* maksima

w_{min} : Koefisien *inertia* minimal

it : Iterasi yang selalu berubah dari 1, 2, 3..... it_{max}

it_{max} : Nilai iterasi maksimal yang di tentukan

1) *Fungsi Objektif*: Masalah koordinasi rele dari OCR, dimana fungsi objektif adalah untuk meminimalkan waktu operasi rele primer di penyulang. Melalui dua jenis *setting* rele yaitu *setting* waktu TMS dan *setting* PSM. Fungsi objektif menjadi tujuan utama optimalisasi. Pada tugas akhir ini fungsi objektif nya adalah sebagai berikut [4]:

$$Min Z = \sum_{i=1}^n t_{opi} \tag{7}$$

Dimana:

t_{opi} = Waktu operasi rele primer gangguan pada i

2) *Karakteristik Rele*: Karakteristik *over current relay* adalah *standard inverse relay* dengan koefisien λ adalah 0.14 dan γ adalah 0.02 dengan persamaan sebagai berikut [4]

$$\alpha = \frac{\lambda}{(PSM)^\gamma - 1} \tag{8}$$

Pada Persamaan 8, PSM yang digunakan adalah PSM penyulang. Sehingga untuk memperoleh fungsi objektif waktu operasi rele (t_{opi}) adalah [4]:

$$Min Z = \sum_{i=1}^n \alpha_i * TMS_i \tag{9}$$

Jadi TMS (*Time Multiplier Setting*) dihasilkan menggunakan metode PSO.

3) *Batasan Waktu Rele Beroperasi*: Adapun untuk mengetahui batasan waktu rele beroperasi sebagai berikut [6]:

$$\text{Min } t_{opi} \leq t_{opi} \leq \text{Max } t_{opi} \tag{10}$$

$$0.1 \leq TMS \leq 1.1 \tag{11}$$

Dimana :

$\text{Min } t_{opi}$ = waktu operasi rele primer minimum

$\text{Max } t_{opi}$ = waktu operasi rele primer maksimum

4) *Kriteria Waktu Interval Koordinasi Rele*: Perbedaan antara waktu operasi dari rele primer dan rele *back up* lebih besar dari atau sama dengan CTI (*Coordination Time Interval*) sebagai berikut [6]:

$$t_{opib} - t_{opi} \geq \text{CTI} \tag{12}$$

Dimana :

t_{opib} = waktu operasi rele *back up* pada gangguan i

t_{opi} = waktu operasi rele primer pada gangguan pada i

CTI = *Coordination Time Interval* (0.3 – 0.4 s)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang perbandingan *setting* OCR antara metode konvensional dengan metode PSO. Sebelum menentukan *setting* OCR terlebih dahulu melakukan pemodelan *single line* diagram menggunakan *software* Etap 12.6 yang digunakan untuk simulasi gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat yang digunakan adalah hubung singkat 2 fasa dan 3 fasa didasarkan pada titik lokasi gangguan.

A. Perhitungan Setting Over Current Relay

Perhitungan *setting* OCR terdiri dari perhitungan *setting* OCR di sisi penyulang (rele primer) dan di sisi *incoming* trafo (rele *back up*). Pada perhitungan ini dicari nilai PSM dan TMS pada setiap rele.

1) *Perhitungan Setting OCR di Sisi Penyulang Gumul*: Arus gangguan hubung yang dipilih untuk penentuan *setting* OCR adalah arus gangguan yang terbesar yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di bus 1. Perhitungan *setting* arus (Iset), PSM dan TMS sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1.2 \times \text{IFLA} \\ &= 1.2 \times 400 \text{ A} \\ &= 480 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_{set}} \\ &= \frac{12762 \text{ A}}{480 \text{ A}} \\ &= 26.6 \end{aligned}$$

Waktu operasi rele awal di Penyulang Gumul yang telah ditetapkan sebesar 0.3 sekon ($t = 0.3 \text{ s}$) agar rele tidak *trip*.

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\lambda}{(\text{PSM})^{\gamma} - 1} \times t \\ &= \frac{0.14}{(26.6)^{0.02} - 1} \times 0.3 \end{aligned}$$

$$= 0.1453 \text{ s}$$

2) *Perhitungan Setting OCR di Sisi Incoming Trafo*: Arus gangguan hubung singkat yang dipilih sama dengan penyulang Gumul. Perhitungan *setting* arus (Iset), PSM dan TMS sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{set} &= 1.2 \times \text{IFLA} \\ &= 1.2 \times 1732 \text{ A} \\ &= 2078.4 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_{set}} \\ &= \frac{12762 \text{ A}}{2078.4 \text{ A}} \\ &= 6.1 \end{aligned}$$

Setting OCR pada *incoming* trafo yang sebagai rele *back up* harus menyesuaikan *grading time* sebesar 0.3 s.

$$\begin{aligned} t &= t \text{ primer (penyulang)} + \text{grading time} \\ &= 0.3 + 0.3 \\ &= 0.6 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TMS} &= \frac{\lambda \times t}{(\text{PSM})^{\gamma} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.6}{(6.1)^{0.02} - 1} \\ &= 0.1584 \text{ s} \end{aligned}$$

TABEL I
ARUS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT

Bus	Jarak	3 Fasa (A)	2 fasa (A)
Bus 1	0% (0 km)	12762	11052
Bus 15	25% (10.111 km)	6396	5539
Bus 34	50% (20.462 km)	5885	5096
Bus 55	75% (31.105 km)	5268	4562
Bus 61	100% (41.537 km)	3525	3257

TABEL II
PSM DAN TMS DI SETIAP LOKASI GANGGUAN

Bus	Jarak	PSM Gangguan 3 Fasa	PSM Gangguan 2 Fasa
Penyulang TMS 0.1453 s			
Bus 1	0% (0 km)	26.6	23.0
Bus 15	25% (10.111 km)	13.3	11.5
Bus 34	50% (20.462 km)	12.3	10.6
Bus 55	75% (31.105 km)	11.0	9.5
Bus 61	100% (41.537 km)	7.3	6.8
Incoming Trafo TMS 0.1584 s			
Bus 1	0% (0 km)	6.1	5.3
Bus 15	25% (10.111 km)	3.1	2.7
Bus 34	50% (20.462 km)	2.8	2.5
Bus 55	75% (31.105 km)	2.5	2.2
Bus 61	100% (41.537 km)	1.7	1.6

B. Perhitungan Waktu Operasi Rele

Perhitungan ini terdiri dari perhitungan waktu operasi rele (t) pada penyulang dan *incoming* trafo. Waktu operasi rele (t) ditentukan berdasarkan titik lokasi gangguan yang terjadi di 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang.

1) Perhitungan Waktu Operasi Rele Penyulang Gumul: Pada perhitungan ini dipilih salah satu lokasi gangguan yaitu pada lokasi gangguan di 0% (0 km). Berikut perhitungan waktu operasi rele (t) OCR penyulang pada gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa:

Perhitungan waktu operasi rele gangguan 3 fasa:

$$t = \frac{0.14 \times TMS}{PSM^{0.02} - 1}$$

$$= \frac{0.14 \times 0.145}{26.6^{0.02} - 1}$$

$$= 0.3 \text{ s}$$

Perhitungan waktu operasi rele gangguan 2 fasa:

$$t = \frac{0.14 \times TMS}{PSM^{0.02} - 1}$$

$$= \frac{0.14 \times 0.145}{23^{0.02} - 1}$$

$$= 0.3142 \text{ s}$$

2) Perhitungan Waktu Operasi Rele Incoming Trafo:

Perhitungan ini sama halnya dengan di penyulang, dimana 0% (0 km) sebagai lokasi gangguan untuk menentukan waktu operasi rele (t) pada gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa.

Perhitungan waktu operasi rele gangguan 3 fasa:

$$t = \frac{0.14 \times TMS}{PSM^{0.02} - 1}$$

$$= \frac{0.14 \times 0.158}{6.1^{0.02} - 1}$$

$$= 0.6 \text{ s}$$

Perhitungan waktu operasi rele gangguan 2 fasa:

$$t = \frac{0.14 \times TMS}{PSM^{0.02} - 1}$$

$$= \frac{0.14 \times 0.158}{5.3^{0.02} - 1}$$

$$= 0.6526 \text{ s}$$

3) Koordinasi OCR Sebelum Menggunakan PSO:

Koordinasi OCR ini menggunakan hasil perhitungan metode konvensional, dimana *setting* rele TMS dihitung secara manual untuk memperoleh waktu operasi rele di penyulang dan *incoming* trafo.

Perhitungan CTI di lokasi gangguan bus 1 gangguan 3 fasa:

$$CTI = t_{incoming} - t_{penyulang}$$

$$= 0.6 - 0.3$$

$$= 0.3 \text{ s}$$

Perhitungan CTI di lokasi gangguan bus 1 gangguan 2 fasa:

$$CTI = t_{incoming} - t_{penyulang}$$

$$= 0.6526 - 0.3142$$

$$= 0.3384 \text{ s}$$

TABEL III
WAKTU OPERASI RELE KONVENSIONAL

Bus	Jarak (km)	Waktu Operasi Rele Gangguan 3 Fasa (s)	Waktu Operasi Rele Gangguan 2 Fasa (s)
Penyulang			
Bus 1	0% (0)	0.3000	0.3142
Bus 15	25% (10.111)	0.3827	0.4058
Bus 34	50% (20.462)	0.3957	0.4205
Bus 55	75% (31.105)	0.4145	0.4416
Bus 61	100% (41.537)	0.5000	0.5211
Incoming Trafo			
Bus 1	0% (0)	0.6000	0.6526
Bus 15	25% (10.111)	0.9755	1.1203
Bus 34	50% (20.462)	1.0544	1.2254
Bus 55	75% (31.105)	1.1813	1.3995
Bus 61	100% (41.537)	2.0881	2.4576

TABEL IV

cti (coordination time interval) pada ocr konvensional

Bus	Jarak (km)	Incoming (s)	Penyulang (s)	CTI (s)
Gangguan 3 Fasa				
Bus 1	0	0.600	0.300	0.300
Bus 15	10.111	0.9755	0.3827	0.5928
Bus 34	20.462	1.0544	0.3957	0.6587
Bus 55	31.105	1.1813	0.4145	0.7668
Bus 61	41.537	2.0881	0.500	1.588
Gangguan 2 Fasa				
Bus 1	0	0.6526	0.3142	0.3384
Bus 15	10.111	1.1203	0.4058	0.7145
Bus 34	20.462	1.2254	0.4205	0.8049
Bus 55	31.105	1.3995	0.4416	0.9579
Bus 61	41.537	2.4576	0.5211	1.9365

C. Setting Over Current Relay Pada PSO

Setting OCR PSO mencari *setting* waktu TMS yang optimal pada rele penyulang untuk meminimalkan waktu operasi rele penyulang. Maka pada PSO diperlukan parameter-parameter PSO yang dapat dilihat pada Tabel V yang telah sesuai dengan batasan-batasan yang telah ditentukan agar memperoleh nilai yang optimal dengan mempertimbangkan *setting* OCR.

Setelah menentukan inisialisasi pada parameter PSO, kemudian mengupdate posisi dan kecepatan partikel, lalu evaluasi *fitness* dengan menggunakan fungsi objektif pada tiap partikel. P_{best} terbaik ditentukan dengan membandingkan dengan P_{best} dari iterasi sebelumnya. Kemudian P_{best} terbaik ditetapkan sebagai G_{best} terbaik, maka G_{best} terbaik sebagai

fitness terbaik. Sehingga mendapatkan nilai *fitness* minimum dengan mengecek solusi apakah sudah mencapai konvergen dimana posisi semua partikel menuju ke satu nilai yang sama dengan melalui iterasi sebanyak 100 kali iterasi.

Proses iterasi dilakukan sampai kriteria terpenuhi, berhenti pada nilai *fitness* yang cukup baik atau sampai pada jumlah iterasi yakni 100 kali iterasi. Maka dengan 100 kali iterasi menghasilkan *fitness* terbaik yaitu pada posisi terbaik 0.1197 s dengan *best cost* sebesar 0.2471 s. Sehingga iterasi sangat mempengaruhi hasil *fitness* yang didapatkan. Hal ini dikarenakan sering terjadinya proses *update* posisi yang terjadi pada tiap iterasi. Dalam menentukan jumlah iterasi maksimum juga disarankan berdasarkan kompleksitas dari masalah yang akan diselesaikan. Jumlah iterasi apabila terlalu banyak ataupun sangat sedikit akan membuat komputasi semakin lama apabila hanya jumlah maksimum iterasi ini yang menjadi suatu patokan [7].

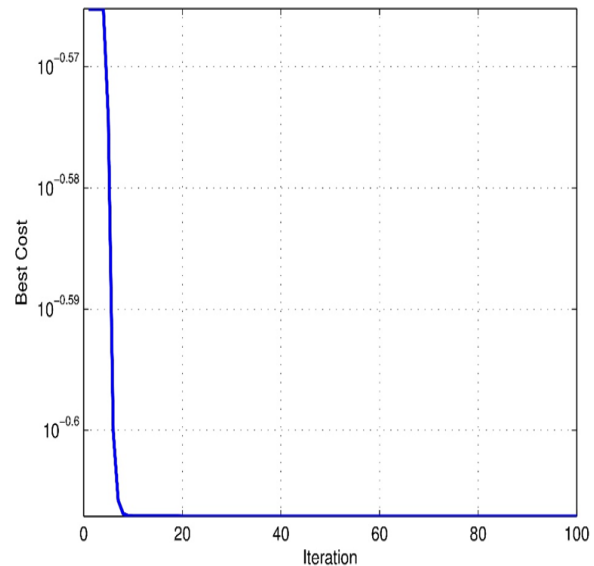
Pengaruh iterasi tersebut terhadap nilai *fitness* sudah mencapai konvergen. Hal ini diakibatkan posisi selanjutnya yang akan ditempuh oleh suatu partikel akan dipengaruhi oleh posisi terbaik dari partikel yang ada pada sebelumnya dan juga posisi terbaik dari semua partikel. Apabila posisi terbaik tersebut tidak akan terjadi perubahan di *local optimum*, maka partikel akan cepat mengalami konvergen lalu sebaliknya apabila posisi terbaik tersebut masih adanya perubahan di *local optimum*, maka partikel belum dapat konvergen [7].

Dapat dilihat Gbr. 2 grafik mengalami penurunan secara linear sehingga mendapatkan posisi dengan cepat yaitu solusi yang paling optimum dengan diperolehnya *fitness* terbaik. Dapat diketahui bahwa dengan menggunakan nilai parameter PSO dengan iterasi 100, W_{min} 0.4, W_{max} 0.9, c_1 0.045 dan c_2 0.5 dapat memperoleh nilai *fitness* yang cukup baik. Pengambilan data pada hasil PSO dicari nilai paling minimum untuk *setting* OCR yang optimal. Jadi hasil PSO yang diperoleh dari nilai *fitness* terbaik adalah TMS 0.1197 s dengan waktu operasi rele (t) paling minimum sebesar 0.2471 s. Pencarian TMS yang optimal pada PSO dicari nilai yang mendekati batas minimal variabel TMS. Dimana batasan minimal TMS sebesar 0.1 s.

1) Hasil Perbandingan Waktu Operasi Rele Konvensional dengan PSO:

TABEL V
PARAMETER PSO

No.	Parameter	Keterangan
1.	Iterasi	100
2.	Jumlah partikel	50
3.	W_{min}	0.4
4.	W_{max}	0.9
5.	TMSmin	0.1
6.	TMS max	1.1
7.	c_1	0.045
8.	c_2	0.5

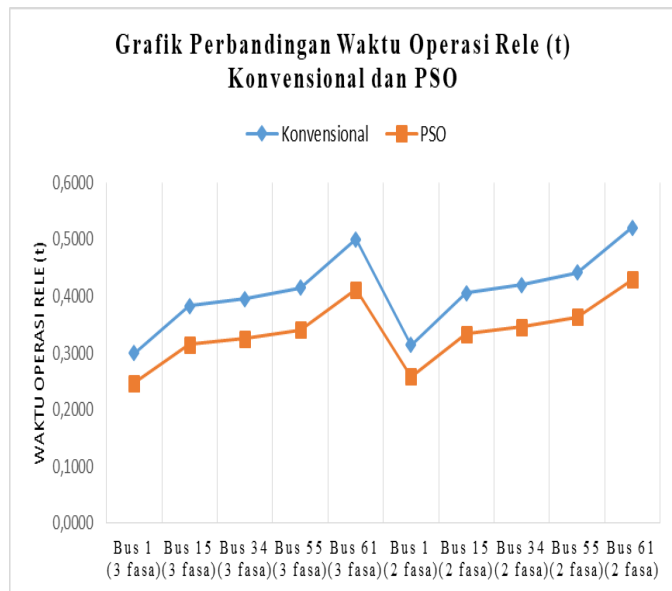


Gbr. 2 Grafik hasil akhir iterasi dengan Best Cost pada PSO

TABEL VI
HASIL PERBANDINGAN WAKTU OPERASI RELE KONVENSIONAL DENGAN PSO

Bus	Jarak	TMS 0.1453 s	TMS 0.1197 s
		Waktu Operasi Rele Konvensional (s)	Waktu Operasi Rele PSO (s)
Gangguan 3 Fasa			
Bus 1	0% (0 Km)	0.300	0.2471
Bus 15	25% (10.111 Km)	0.3827	0.3153
Bus 34	50% (20.462 Km)	0.3957	0.3260
Bus 55	75% (31.105 Km)	0.4145	0.3415
Bus 61	100% (41.537 Km)	0.500	0.4119
$\sum t$		1.9929	1.6418
Gangguan 2 Fasa			
Bus 1	0% (0 Km)	0.3142	0.2588
Bus 15	25% (10.111 Km)	0.4058	0.3343
Bus 34	50% (20.462 Km)	0.4205	0.3464
Bus 55	75% (31.105 Km)	0.4416	0.3638
Bus 61	100% (41.537 Km)	0.5211	0.4293
$\sum t$		2.1032	1.7326
Total t		4.0961	3.3743

Dari Tabel VI dapat dilihat bahwa waktu operasi rele (t) menggunakan PSO lebih cepat dibandingkan waktu operasi rele (t) dengan perhitungan konvensional. Hal ini dikarenakan PSO tersebut menghasilkan TMS yang optimal, dimana nilai TMS pada PSO sebesar 0.1197 s sedangkan nilai TMS pada perhitungan konvensional sebesar 0.1453 s. Waktu operasi rele (t) OCR pada PSO cukup cepat atau hasilnya minimum dibandingkan dengan waktu operasi rele (t) OCR dengan perhitungan konvensional yang waktu operasi rele lebih lama. Maka hasil PSO tersebut sesuai dengan fungsi objektif yaitu waktu operasi rele (t) penyulang yang dihasilkan minimum.



Gbr. 3 Grafik perbandingan waktu operasi rele konvensional dan PSO

Jarak lokasi gangguan mempengaruhi waktu operasi rele (t), dimana semakin panjang lokasi gangguan maka waktu operasi rele (t) semakin lama dan sebaliknya. Dapat dibuktikan pada bus 1, dimana lokasi gangguan sepanjang 0 km menghasilkan waktu operasi rele lebih cepat (nilainya lebih kecil) dari pada waktu operasi rele pada lokasi gangguan 41.537 km. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa semakin panjang jarak lokasi gangguan nilai arus gangguan hubung singkat semakin kecil. Maka pada Tabel III dapat dilihat bahwa semakin panjang jarak lokasi gangguan nilai arus gangguan hubung singkat semakin kecil sehingga waktu operasi rele (t) semakin lama. Maka grafik pada Gbr 3 sesuai dengan karakteristik waktu OCR yang digunakan yaitu *standard invers*, dimana semakin besar arus gangguan maka semakin cepat waktu operasi rele (t). Sehingga besar kecilnya arus gangguan hubung singkat mempengaruhi cepat lambatnya waktu operasi rele (t). Setelah diperoleh *setting* waktu OCR pada TMS penyulang menggunakan PSO, maka dapat dikoordinasikan antara waktu operasi rele (t) penyulang dengan waktu operasi rele (t) *incoming* trafo agar dapat diketahui nilai CTI.

TABEL VII
CTI (COORDINATION TIME INTERVAL) PADA OCR MENGGUNAKAN PSO

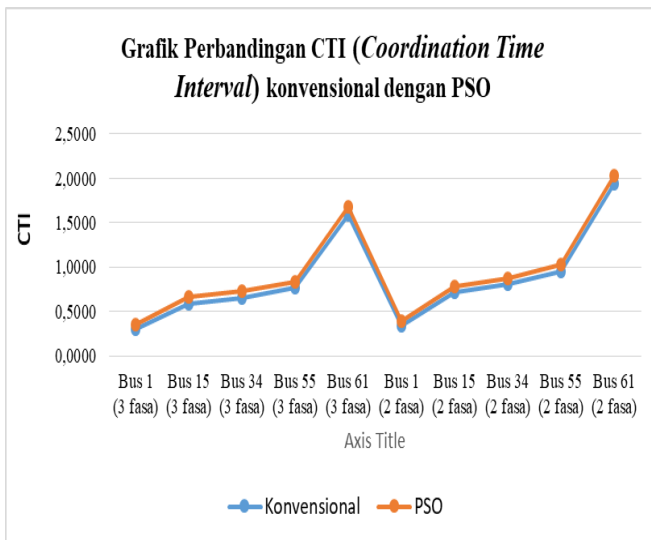
Bus	Jarak (km)	Waktu operasi rele Incoming (s)	Waktu operasi rele Penyulang (s)	CTI (s)
Gangguan 3 Fasa				
Bus 1	0	0.600	0.2471	0.3529
Bus 15	10.111	0.9755	0.3150	0.6602
Bus 34	20.462	1.0544	0.3257	0.7284
Bus 55	31.105	1.1813	0.3412	0.8398
Bus 61	41.537	2.0881	0.4116	1.6761
Gangguan 2 Fasa				
Bus 1	0	0.6526	0.2586	0.3938
Bus 15	10.111	1.1203	0.3340	0.7860
Bus 34	20.462	1.2254	0.3461	0.8790
Bus 55	31.105	1.3995	0.3635	1.0357
Bus 61	41.537	2.4576	0.4289	2.0283

2) Hasil Perbandingan Koordinasi OCR antara konvensional dengan PSO:

TABEL VIII
PERBANDINGAN CTI (COORDINATION TIME INTERVAL) KONVENSIONAL DAN PSO

Bus	Jarak	CTI Konvensional (s)	CTI PSO (s)
Gangguan 3 Fasa			
Bus 1	0% (0 km)	0.300	0.3529
Bus 15	25% (10.111 km)	0.5928	0.6602
Bus 34	50% (20.462 km)	0.6587	0.7284
Bus 55	75% (31.105 km)	0.7668	0.8398
Bus 61	100% (41.537 km)	1.588	1.6761
Gangguan 2 Fasa			
Bus 1	0% (0 km)	0.3384	0.3938
Bus 15	25% (10.111 km)	0.7145	0.7860
Bus 34	50% (20.462 km)	0.8049	0.8790
Bus 55	75% (31.105 km)	0.9579	1.0357
Bus 61	100% (41.537 km)	1.9365	2.0283





Gbr. 4 Grafik perbandingan CTI konvensional dan PSO

Pada Tabel VIII dapat dilihat bahwa koordinasi OCR PSO diperoleh CTI yang meningkat sebesar 0.3529 dari CTI sebelumnya yang menggunakan konvensional sebesar 0.3 s. Hal ini dikarenakan semakin cepat nilai waktu operasi rele (t) maka semakin meningkat nilai CTI. Nilai CTI yang diperoleh hasil PSO masih memenuhi standar CTI berdasarkan IEEE 242-2001 yaitu 0.3 - 0.4 s. Nilai CTI diperoleh dari selisih antara waktu operasi rele (t) *incoming* dengan waktu operasi rele (t) penyulang.

Pada Gbr 4 grafik diatas dapat diketahui bahwa semakin panjang jarak lokasi gangguan maka CTI (*Coordination Time Interval*) semakin meningkat, dimana arus gangguan tersebut dipengaruhi oleh jarak lokasi. Dapat diketahui bahwa semakin panjang jarak lokasi gangguan maka semakin kecil arus gangguan hubung singkat dan waktu operasi rele (t) semakin lama.

Dari perbandingan TMS penyulang perhitungan konvensional dan PSO diperoleh hasil PSO menghasilkan TMS optimal sebesar 0.1197 s sedangkan hasil konvensional memiliki TMS sebesar 0.1453 s. Maka dapat dibandingkan bahwa waktu operasi rele (t) hasil PSO sebesar 0.2471 s lebih cepat dengan menghasilkan waktu operasi rele (t) yang minimum daripada waktu operasi rele (t) hasil konvensional sebesar 0.300 s. Dapat diketahui bahwa jarak lokasi gangguan mempengaruhi waktu operasi rele (t) dan CTI. Dimana semakin panjang jarak lokasi gangguan maka semakin besar waktu operasi rele (t) dan CTI.

Pencarian solusi terbaik nilai TMS optimal PSO mendekati batas minimal TMS sebesar 0.1197 s. Dapat diketahui bahwa PSO mencari nilai TMS yang minimum, tetapi tidak berada pada posisi batas minimal TMS, namun mendekati batas minimal TMS. Nilai TMS hasil PSO yang diperoleh sebesar 0.1197 s, sedangkan nilai TMS tersebut mendekati batas minimal TMS 0.1 s. Hasil PSO tersebut mempengaruhi nilai CTI. Nilai CTI hasil PSO semakin meningkat yaitu sebesar 0.3529 s sedangkan CTI hasil konvensional sebesar 0.300 s.

Maka dapat diperoleh bahwa fungsi objektif pada PSO menghasilkan waktu operasi rele (t) penyulang yang minimum. Jadi, hasil *setting* OCR menggunakan PSO menghasilkan TMS yang optimal sebesar 0.1197 s dengan waktu operasi rele (t) OCR penyulang cukup cepat sebesar 0.2471 s yang menghasilkan CTI semakin meningkat sebesar 0.3529 s. Sehingga menghasilkan koordinasi OCR antar rele penyulang dengan rele *incoming* dapat bekerja cukup selektif dengan mengisolasi gangguan secara tepat.

IV. KESIMPULAN (PENUTUP)

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penentuan optimasi koordinasi OCR dengan PSO didasarkan pada parameter-parameter PSO yaitu PSM penyulang sebesar 26.6, batasan TMS antara 0.1 sampai 1.1 s, koefisien karakteristik waktu *standard invers* 0.14 dan 0.02, iterasi sebanyak 100, jumlah partikel sebanyak 50, c_1 dan c_2 sebesar 0.045 dan 0.5, *inertia weight* W_{max} dan W_{min} adalah 0.4 dan 0.9.
2. *Setting* waktu OCR pada TMS penyulang pada hasil PSO diperoleh nilai TMS sebesar 0.1197 s dengan waktu operasi rele (t) sebesar 0.2471 s, sedangkan hasil dari metode konvensional diperoleh nilai TMS sebesar 0.1453 s dengan waktu operasi rele (t) yaitu sebesar 0.3 s. Maka *setting* waktu OCR pada TMS penyulang dengan metode PSO menghasilkan waktu operasi rele (t) lebih cepat daripada waktu operasi rele (t) dengan metode konvensional.
3. Koordinasi OCR antara rele penyulang dengan rele *incoming* trafo hasil PSO menghasilkan CTI yang meningkat sebesar 0.3529 s, sedangkan hasil dari metode konvensional diperoleh CTI sebesar 0.300 s. Jadi, semakin cepat waktu operasi rele (t) dari hasil PSO, semakin meningkat pula CTI.
4. Jarak lokasi gangguan pada OCR mempengaruhi waktu operasi rele dan CTI. Dapat dibuktikan pada hasil PSO di bus 1 (lokasi gangguan 0 km) gangguan 3 fasa memiliki waktu operasi rele sebesar 0.2471 s dan CTI sebesar 0.3529 s, sedangkan pada bus 15 (lokasi gangguan 10.111 km) gangguan 3 fasa memiliki waktu operasi rele sebesar 0.3150 s dan CTI sebesar 0.6602 s. Maka semakin panjang jarak lokasi gangguan, semakin meningkat waktu operasi rele dan CTI.

REFERENSI

- [1] Gunara Fery Fahnani, Yuningtyastuti, and Susatyo Handoko, S., "Simulasi Optimasi Daya Reaktif dan Tegangan pada Sistem Jamali 500 kV Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization," *TRANSIENT Universitas Diponegoro Semarang*, vol 2, No.2, Juni 2013.
- [2] IEEE Standards Board, *Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, USA: Std 242, 2001.
- [3] IEEE Standards Board, *Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, USA: Std 242, 1986.
- [4] M. Lakshmia, Ragul Deepak Narayanasamy, Nilabhra Banerjeeb, O. V. Gnana Swathikab, "Optimum Coordination of Overcurrent Relays using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," *SUSCOM India*, 2019.

- [5] Budi Santosa, "Particle Swarm Optimization," *Graha Ilmu ITS Surabaya*, vol 2, 2011.
- [6] Mostafa Kheshti, Browh Serge Tekpeti and Xiaoning Kang "The Optimal Coordination of Over-current Relay Protection in Radial Network Based on Particle Swarm Optimization," *IEEE PES China*, 2016.
- [7] Andries P. Engelbrecht, *Computational Intelligence*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England:2007.

