

# Optimasi Total Operating Time Relay Arus Lebih dengan Pertimbangan Konfigurasi Mesh, Open-mesh, dan Radial Menggunakan *Firefly Algorithm*

Fauzanul Abidin, Margo Pujiantara, dan Dimas Fajar Uman Putra  
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: margo@ee.its.ac.id

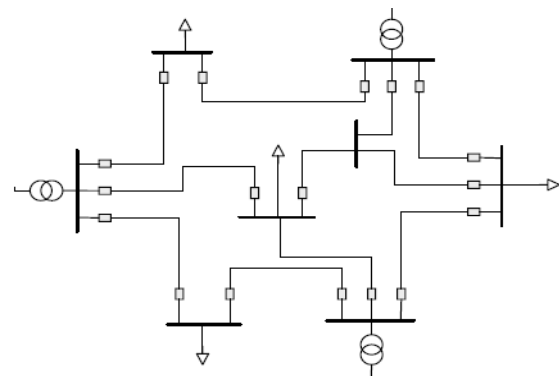
**Abstrak**—Dalam Sebuah sistem tenaga yang saling terinterkoneksi sering terjadi kondisi abnormal (seperti: overload, overvoltage, overcurrent, dsb). Karenanya, gangguan pada sumber dan peralatan yang terhubung sering terjadi kerusakan. Dalam hal ini, komponen yang terkena gangguan harus segera diidentifikasi dan diisolasi untuk menjamin supply terpenuhi dan menjaga stabilitas sistem, untuk itu dibutuhkanlah proteksi yang handal. Sistem jaringan distribusi mesh merupakan sistem jaringan dengan kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin, mengingat sistem ini juga dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik yang bekerja secara paralel. Plant IEEE dengan 4 bus, 6 bus, 9 bus, 12 bus merupakan bentuk jaringan distribusi mesh, dimana plant tersebut sangat sulit atau kompleks untuk menentukan sistem proteksinya dibandingkan dengan jaringan radial. Kondisi ketika salah satu feeder open atau terbuka menjadi masalah terutama dalam mengkoordinasikan rele arus lebih pada kondisi tersebut. Hasil dari studi ini adalah setting rele arus lebih dengan pertimbangan sistem konfigurasi mesh, open-mesh dan radial. Program metode perhitungan FA membutuhkan rata-rata 8 iterasi untuk mendapatkan TDS yang terkoordinasi dan total waktu operasi minimum.

**Kata Kunci**—Koordinasi Proteksi, Konfigurasi, *Time Dial Setting*, *Firefly Algorithm*.

## I. PENDAHULUAN

KUALITAS produksi pada suatu industri sangat bergantung pada sistem kelistrikannya. Dengan sistem kelistrikan yang baik maka kontinuitas produksi pada suatu industri juga akan berjalan baik pula. Salah satu hal penting yang harus diperhatikan untuk menjaga kontinuitas daya listrik yaitu koordinasi proteksi yang baik pada sistem penyaluran tenaga listrik.

Sistem proteksi berfungsi untuk memutus arus gangguan yang terjadi secara cepat dan selektif. Tujuannya agar ketika terjadi gangguan tidak sampai mengganggu kinerja sistem dan merusak peralatan yang ada. Salah satu alat yang digunakan adalah rele arus lebih (*overcurrent rele*). Rele arus lebih akan merasakan dan mengenali gangguan (hubung singkat dan beban lebih) dan mengirimkan sinyal ke circuit breaker. Proteksi dengan menggunakan rele arus lebih waktu *inverse* membutuhkan parameter berupa *Time Dial Setting* (TDS), arus pickup ( $I_p$ ), dan jenis kurva. Dengan sistem proteksi yang terkoordinasi dengan baik maka gangguan yang terjadi dapat diamankan secara selektif dan akurat. Sebuah sistem mesh atau sistem multi-loop sangat



Gambar 1. Sistem Distribusi Mesh

sulit atau kompleks untuk menentukan sistem proteksinya dibandingkan dengan jaringan radial. Kondisi sistem kelistrikan yang berupa ring-loop/mesh bisa saja terputus atau mengalami *open line* dan menjadi radial loop. Dari semua kemungkinan konfigurasi yang terjadi pada kondisi tersebut, dibutuhkan setting proteksi yang sesuai agar didapat koordinasi waktu operasi antar rele. Sehingga diperlukan metode optimasi berupa firefly algorithm dengan tujuan meminimalkan total waktu operasi rele yang bekerja.

## II. DASAR TEORI

### A. Sistem Jaringan Distribusi Mesh

Sistem ini merupakan kombinasi antara radial dan loop atau biasanya disebut multi-loop. Dalam sistem ini titik beban memiliki banyak alternatif saluran, sehingga bila salah satu saluran terganggu, maka dengan segera dapat digantikan oleh saluran yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin, mengingat sistem ini juga dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik yang bekerja secara paralel. Keuntungan dari sistem ini adalah :

1. Kontinuitas penyaluran daya cukup terjamin
2. Dibanding sistem yang lainnya sistem ini paling baik dalam memenuhi kebutuhan beban.
3. Gangguan yang terjadi pada salah satu saluran tidak akan mengganggu kontinuitas pelayanan. Namun disamping keuntungannya sistem distribusi mesh masih memiliki beberapa kelemahan, yaitu biaya konstruksi dan pembangunannya lebih tinggi/mahal serta setting proteksinya lebih sulit

Terlihat pada Gambar 1 sistem ini biasanya digunakan pada daerah-daerah yang memiliki kepadatan tinggi dan

Tabel 1.  
Koefisien Invers Time Dial

Tipe Kurva	k	$\alpha$	$\beta$
Long Time Inverse	120	1	13,33
Standard Inverse	0,14	0,02	2,97
Very Inverse	13,5	1	1,5
Extremely Invers	80	2	0,808
Ultra Inverse	315,2	2,5	1

Tabel 2.  
Data Generator

No	ID Unit	Rating Daya (MW)	Tegangan (kV)	PF (%)
1	Gen1	20	13.8	85
2	Gen2	20	13.8	85
3	Gen3	20	13.8	85
4	Gen4	20	13.8	85

Tabel 3.  
Data Beban pada Setiap Bus

No	ID	Bus	MVA	kV	PF (%)
1	Lump 1	6	10	13.8	85
2	Lump 2	5	10	13.8	85
3	Lump 3	4	10	13.8	85
4	Lump 4	3	10	13.8	85
5	Lump 5	2	10	13.8	85
6	Lump 6	1	10	13.8	85

mempunyai kapasitas dan kontinuitas pelayanan yang sangat baik [1]. Sistem proteksi pada konfigurasi mesh

**B. Dasar Proteksi Sistem Tenaga Listrik**

Proteksi pada sistem kelistrikan industri bertujuan untuk mengurangi kerusakan peralatan akibat adanya gangguan. Proteksi yang terkoordinasi dengan baik dapat membatasi lama waktu terjadinya gangguan yang diakibatkan oleh kerusakan peralatan, kesalahan pengoperasian maupun gangguan dari luar sistem [2]. Sistem proteksi harus bekerja secara cepat dan akurat untuk mengisolasi gangguan, selektif dalam mengisolasi gangguan, memiliki tingkat keandalan yang tinggi, serta memiliki sensitivitas yang baik sehingga peralatan proteksi dapat mendeteksi terjadinya gangguan dengan nilai sekecil mungkin [3].

**C. Rele Arus Lebih Waktu Inverse**

Karakteristik dari rele arus lebih waktu *inverse* adalah semakin besar nilai arus maka semakin cepat waktu operasi dari rele. Pada rele arus lebih waktu inverse terdapat beberapa jenis kurva yaitu *long time inverse*, *standard inverse*, *short time inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*. Pada rele arus lebih waktu *inverse*, parameter yang perlu diatur yaitu jenis kurva, nilai arus *pickup* dan *Time Dial Setting* (TDS). Nilai arus *pickup* merupakan nilai minimum rele untuk beroperasi sedangkan nilai TDS menunjukkan waktu operasi yang dibutuhkan oleh rele [4]. Berdasarkan *British Standard BS 142*, nilai arus *pickup* dapat ditentukan dari:

$$1,05 FLA \leq I_{set} \leq 1,4 FLA \tag{1}$$

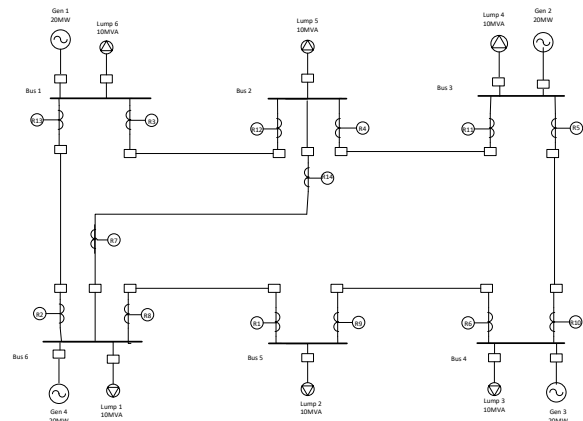
Keterangan:

FLA = Arus beban penuh (Full Load Ampere)

$I_{set}$  = Arus *pickup*

Tabel 4.  
Pasangan Rele Utama dan Rele Backup

No	Forward (CW)		No	Reverse (CCW)	
	Rele utama	Rele backup		Rele utama	Rele backup
1	1	2	9	8	9
2	1	7	10	9	10
3	2	3	11	10	11
4	3	4	12	11	12
5	4	5	13	11	14
6	5	6	14	12	13
7	6	1	15	13	8
8	7	4	16	14	8



Gambar 2. Sistem Konfigurasi Mesh 6 Bus

Setelah didapatkan nilai  $I_{set}$ , maka perlu dilakukan pengaturan tap dengan membandingkan nilai  $I_{set}$  dengan belitan primer dari CT yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Tap = \frac{I_{set}}{nCT Primer} \tag{2}$$

Sedangkan untuk menentukan nilai TDS dapat digunakan rumus berikut:

$$t_{op} = \frac{k \times TDS}{\left[ \left( \frac{I_{sc}}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right] \times \beta} \tag{3}$$

Keterangan:

$t_{op}$  = Waktu operasi rele

$k, \alpha, \beta$  = Koefisien rele (tergantung dari jenis rele)

$I_{sc}$  = Arus gangguan yang mengalir

$I_{set}$  = Arus *pickup*

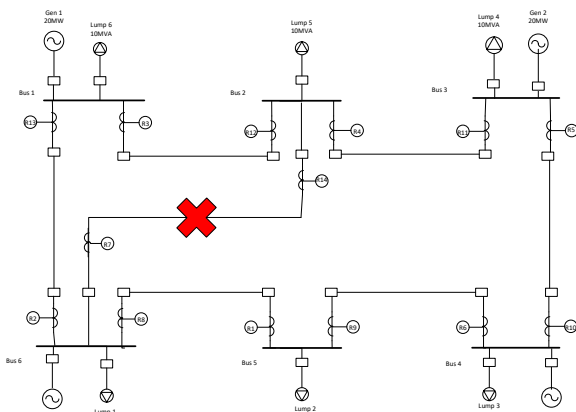
Persamaan (3) disusun berdasarkan beberapa koefisien yang dilampirkan pada Tabel 1 [5].

**D. Rele Arah Arus Lebih**

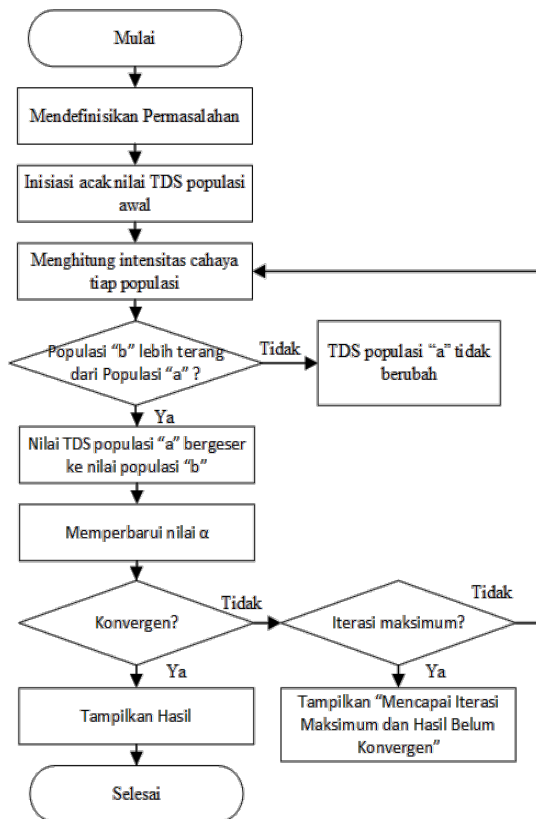
Rele arah memiliki fungsi untuk membedakan arah suplai arus. Rele arah biasa dipasang bersamaan dengan rele arus lebih sehingga saat melakukan setting rele menjadi rele arah arus lebih. Arah yang dimaksud adalah arah *forward* dan *reverse*. Rele jenis ini menggunakan hubungan antara fasa arus dan fasa tegangan untuk menentukan arah gangguan. Rele arah arus lebih akan sangat berguna dan mempermudah melakukan setting rele pada sistem multi source seperti konfigurasi mesh ataupun loop.

**E. Firefly Algorithm**

Firefly Algorithm (FA) pertama kali dikembangkan oleh Xin-She Yang pada akhir 2007 dan 2008 di Universitas Cambridge yang didasarkan pada pola dan perilaku kunang-kunang. Intinya, FA menggunakan tiga aturan ideal berikut:



Gambar 3. Sitem Konfigurasi Open Mesh.



Gambar 4. Flowchart perhitungan TDS dan waktu operasi dengan FA

- Kunang-kunang bersifat uniseks sehingga satu kunang-kunang akan tertarik pada kunang-kunang lainnya tanpa memandang jenis kelaminnya.
- Daya tarik sebanding dengan kecerahan, dan keduanya menurun seiring meningkatnya jarak. Jadi untuk dua kunang-kunang yang berkedip, yang kurang terang akan bergerak ke arah yang lebih terang. Jika tidak ada yang lebih cerah dari kunang-kunang tertentu, itu akan bergerak secara acak.
- Kecerahan kunang-kunang ditentukan oleh lanskap fungsi objektif [6].

Pergerakan posisi kunang-kunang ‘i’ yang tertarik dengan kunang-kunang ‘j’ dimodelkan dalam persamaan berikut.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t \epsilon_i^t \quad (4)$$

Keterangan

$x_i^t$  = Posisi kunang-kunang ‘i’ pada iterasi ke-‘t’.

Table 5.

Pasangan CB tiap feeder		
Line	CB Link	
Z 1-2	C1	D1
Z 2-3	C2	D2
Z 3-4	C3	D3
Z 4-5	C4	D4
Z 5-6	C5	D5
Z 6-1	C6	D6
Z 6-2	C7	D7

Tabel 6. Arus Hubung Singkat Setiap Bus

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Isc max (kA)
1	Bus 1	13.8	21.9
2	Bus 2	13.8	23
3	Bus 3	13.8	22.7
4	Bus 4	13.8	21.8
5	Bus 5	13.8	19.6
6	Bus 6	13.8	24.6

Tabel 7.

Arus Pada Setiap Rele Saat Terjadi Hubung Singkat di Bus 1

Rele primer	Arus (kA)	Rele backup	Arus (kA)
Rele 3	6.96	Rele 4	4.82
Rele 13	7.59	Rele 8	3.26

Tabel 8.

Arus Pada Setiap Rele Saat Terjadi Hubung Singkat di Bus 2

Rele primer	Arus (kA)	Rele backup	Arus (kA)
Rele 4	7.75	Rele 5	2.84
Rele 12	6.16	Rele 13	0.751
Rele 14	6.91	Rele 8	2.49

Tabel 9.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 3

Rele primer	Arus (kA)	Rele backup	Arus (kA)
Rele 5	7.43	Rele 6	2.42
Rele 11	7.93	Rele 12	3.43
Rele 11	7.93	Rele 14	3.08

Tabel 10.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 4

Rele primer	Arus (kA)	Rele backup	Arus (kA)
Rele 6	6.52	Rele 1	3.19
Rele 10	8.01	Rele 11	4.96

$x_j^t$  = Posisi kunang-kunang ‘j’ sebagai pembanding pada iterasi ‘t’.

$r$  = Jarak antara kunang-kunang ‘i’ dan ‘j’.

$\beta$  = Faktor daya tarik antara kunang-kunang pada jarak  $r$

$\beta_0$  = Faktor daya tarik kunang-kunang pada saat  $r = 0$ .

$\gamma$  = Faktor penyerapan cahaya,

$\alpha_t$  = Parameter gerak acak pada iterasi ‘t’

$\epsilon_i^t$  = Vektor angka acak yang berasal dari distribusi gaussian.

Parameter  $\alpha$  memiliki peran penting dalam mengatur pergerakan acak kunang-kunang dalam mencari solusi dengan nilai  $\alpha$  berada di rentan 0 sampai dengan 1. Nilai  $\alpha$  yang besar akan membuat kunang-kunang lebih bereksplorasi dan nilai  $\alpha$  yang kecil akan membuat kunang-kunang lebih bereksplotasi. Bereksplorasi berarti mencari solusi dalam skala global sedangkan bereksplotasi adalah lebih fokus mencari solusi pada daerah sekitarnya. Untuk

Tabel 11.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 5

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 1	9.31	Rele 2	2.81
Rele 1	9.31	Rele 7	2.09
Rele 9	8.2	Rele 10	3.44

Tabel 12.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 6

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 2	5.66	Rele 3	1.77
Rele 7	5.76	Rele 4	4.23
Rele 8	5.82	Rele 9	4.19

Tabel 13.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 1

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 13	10.45	Rele 8	3.21

Tabel 14.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 2

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 4	8.1	Rele 5	3.31
Rele 14	9.36	Rele 8	1.6

Tabel 15.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 3

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 5	7.59	Rele 6	2.64
Rele 11	6.6	Rele 14	5.05

Tabel 16.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 4

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 6	6.6	Rele 1	5.05
Rele 10	7.59	Rele 11	2.64

Tabel 17.

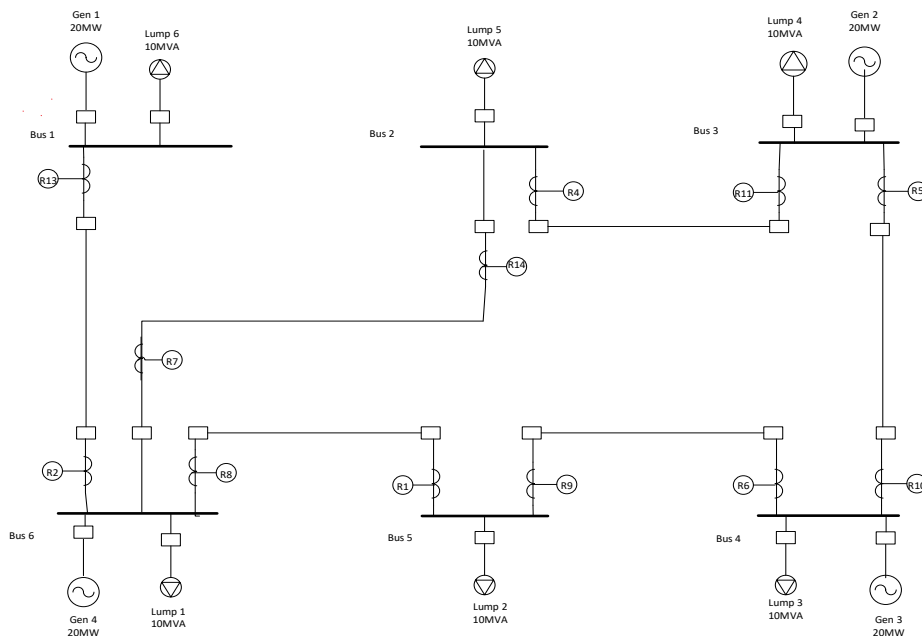
Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 5

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 1	9.36	Rele 2	3.35
Rele 1	9.36	Rele 7	1.6
Rele 9	8.1	Rele 10	3.31

Tabel 18.

Arus pada setiap rele saat terjadi hubung singkat di bus 6

Rele primer	Arus (kA)	Rele <i>backup</i>	Arus (kA)
Rele 7	5.82	Rele 4	4.2
Rele 8	5.82	Rele 9	4.2



Gambar 5. Konfigurasi Open-mesh dan radial

mendapatkan hasil terbaik dibutuhkan kombinasi dari keduanya.

### III. PEMODELAN SISTEM KELISTRIKAN 6 BUS

#### A. Sistem Kelistrikan Konfigurasi Mesh

Studi ini menggunakan sistem IEEE 6-bus dengan beberapa modifikasi dan konfigurasi. Sistem kelistrikan utama adalah sistem distribusi mesh dimana pada sistem ini dilakukan modifikasi dengan adanya 4 buah generator dan 6 buah beban. Masing masing generator mempunyai besar daya 20 MW dan untuk beban nya masing masing menggunakan 10 MVA yang terdapat pada setiap bus nya di tegangan 13,8 kV. Pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Gambar 2 dan Gambar 3 menggambarkan sistem kelistrikan distribusi mesh IEEE 6-Bus yang telah

direkonfigurasi ke dalam kondisi *open mesh (loop)* dengan memisahkan satu case feeder terputus.

#### B. Pasangan Rele Utama dan Rele Backup

Pasangan rele utama dan rele backup dapat ditentukan dengan menentukan arah arus yang mengalir pada sistem. Arah arus pada sistem konfigurasi mesh berasal dari beberapa sumber yang ada pada sistem. Hal ini menyebabkan rele-rele pengaman pada sistem distribusi mesh tergantung pada arah reverse dan forward dari sebuah arus. Dimana arah forward ditentukan dari arah koordinasi proteksi yang searah dengan jarum jam (clock wise) dan reverse ditentukan dari arah koordinasi proteksi yang berlawanan dengan jarum jam (counter clock wise). Terdapat 14 rele yang terpasang pada sistem konfigurasi mesh 6 bus yang masing masing feeder terdapat 2 rele yang bekerja sesuai arah gangguan pada

Tabel 19.

Nilai Hasil Perhitungan Manual Konfigurasi Mesh		
Rele	TDS Manual	Waktu Operasi Manual
1	0.15	0,026
2	0.24	0.117
3	0.08	0.025
4	0.616	0.414
5	0.41	0.115
6	0.115	0.042
7	0.055	0.025
8	0.216	0.11
9	0.28	0.065
10	0.67	0.162
11	0.37	0.11
12	0.21	0.086
13	0.06	0.016
14	0.15	0.054

Tabel 20.

Nilai Hasil Perhitungan Manual Konfigurasi Open-mesh		
Rele	TDS Manual	Waktu Operasi Manual
1	0.15	0,026
2	0.24	0.117
4	0.616	0.414
5	0.41	0.115
6	0.115	0.042
7	0.055	0.025
8	0.216	0.11
9	0.28	0.065
10	0.67	0.162
11	0.37	0.11
13	0.06	0.016
14	0.15	0.054

sistem. Pasangan rele utama dan rele backup pada sistem distribusi mesh dapat dilihat pada Tabel 4.

C. Optimasi Koordinasi Proteksi Menggunakan Algoritma Firefly

Pada perhitungan nilai TDS sistem proteksi mesh menggunakan algoritma FA, dilakukan beberapa langkah guna mencapai nilai TDS dan waktu operasi maksimum. Flowchat dalam perhitungan tersebut disusun seperti Gambar 4.

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

A. Analisa Pola Operasi Sistem

Berdasarkan data generator dan beban, dengan 4 buah generator yang masing masing besarnya 20 MW dan total beban sebesar 60 MVA dengan pf 0.85 maka beban maksimum yang ditanggung sistem tersebut adalah sebesar 51MW. Sehingga, diperlukan minimal ada 3 generator aktif yang mensuplai sistem. Terdapat 5 case operasi yaitu case 8,12,14,15, dan 16. Total case untuk kondisi feeder nya berjumlah 8 maka total kemungkinan ada 40 kemungkinan pola operasi sistem. Pasangan circuit breaker setiap feeder dapat dilihat pada Tabel 5.

B. Analisa Hubung Singkat

Pengambilan nilai-nilai arus hubung singkat pada studi ini dilakukan dengan menggunakan software ETAP 12.6.0, Simulasi arus hubung singkat yang digunakan pada studi ini adalah  $I_{sc\ max}$  3 fasa ketika 0,5 cycle. Hasil simulasi arus hubung singkat maksimal dapat dilihat pada Tabel 6.

1) Arus Hubung Singkat Maksimum Konfigurasi Mesh

Data arus hubung singkat maksimal diambil dari software ETAP 12.6. Pengambilan data arus kontribusi hubung singkat maksimal pada setiap rele merupakan arus nominal hubung singkat pada setiap feeder yang terdapat rele primer dan backup nya, hal ini dilakukan untuk setting kurva invers rele pada perhitungan manual dan program Firefly. Tabel 7-12 merupakan data hasil pengamatan untuk setiap pasangan rele nya,

1. Arus Hubung Singkat Maksimum Konfigurasi Open Mesh dan Radial

Pada kondisi ini dimodelkan dengan memilih case yang mempunyai hubung singkat paling kecil yaitu pada bus 5 dan

juga dipilih arus hubung singkat maksimal pada feeder yaitu ketika kondisi 16-B yang mana feeder Z1-2 mengalami open line. Konfigurasi jaringan berubah menjadi radial dan mesh-open atau konfigurasi loop.

C. Koordinasi Proteksi Konfigurasi Mesh

Pada perhitungan ini dilakukan setting lowset untuk rele. Hal ini digunakan untuk mengamankan sistem dari gangguan bus dan overload.

Perhitungan manual koordinasi proteksi pada sistem konfigurasi mesh digunakan sebagai hasil pembandingan perhitungan koordinasi proteksi pada sistem distribusi konfigurasi mesh dengan algoritma firefly.

Pada perhitungan manual ini, sistem distribusi konfigurasi mesh dibagi menjadi 3 bagian. Sistem dibagi menjadi 3 loop yang merupakan gabungan dari setiap arus kontribusi hubung singkat dari tiap pembangkit dan dihitung nilai TDS pada setiap kondisi untuk memperoleh nilai konvergen pada setiap iterasinya. Nilai TDS dari ketiga loop dipilih konvergensi yang terbesar dan didapat untuk perhitungan manual sistem konfigurasi mesh seperti Tabel 19.

D. Koordinasi Proteksi Konfigurasi Open-mesh dan Radial

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa koordinasi proteksi konfigurasi open mesh dan radial sama seperti dengan perhitungan pada konfigurasi mesh dengan menghilangkan rele 3 dan rele 12 yang mana tidak bekerja karena kondisi terbuka. Sehingga data yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 20.

E. Hasil dan Analisa Simulasi Koordinasi Proteksi pada Konfigurasi Mesh, Open-mesh dan Radial dengan Algoritma Firefly

Untuk melakukan perhitungan waktu operasi dan TDS menggunakan FA, perlu ditentukan parameter terlebih dahulu. Berikut nilai parameter tersebut:

- MaxIt = 1000
- nPop = 50
- R = 1000000
- Gamma = 0.6
- Beta0 = 1
- Alpha = 0.9

Keterangan:

- MaxIt = Iterasi maximum program
- nPop = Jumlah populasi firefly

Tabel 21.

Waktu operasi rele pada konfigurasi mesh dengan algoritma firefly

No	Rele utama	Rele <i>backup</i>	<i>t</i> <sub>primer</sub>	<i>t</i> <sub>backup</sub>	CTI
1	1	2	0.1015	0.3066	0.2051
2	1	7	0.1015	0.3094	0.2079
3	2	3	0.1009	0.734	0.6331
4	3	4	0.1021	0.3069	0.2048
5	4	5	0.1035	0.3167	0.2132
6	5	6	0.1012	0.3037	0.2025
7	6	1	0.1012	0.5156	0.4144
8	7	4	0.1039	0.3578	0.2539
9	8	9	0.1018	0.3147	0.2129
10	9	10	0.1022	0.3205	0.2183
11	10	11	0.1007	0.3073	0.2066
12	11	12	0.1025	0.3151	0.2126
13	11	14	0.1025	0.3233	0.2208
14	12	13	0.1021	1.2312	1.1291
15	13	8	0.1007	0.3084	0.2077
16	14	8	0.1036	0.322	0.2184

Tabel 22.

Waktu operasi rele pada konfigurasi open-mesh dan radial dengan algoritma firefly

No	Rele utama	Rele <i>backup</i>	<i>t</i> <sub>primer</sub>	<i>t</i> <sub>backup</sub>	CTI
1	1	2	0.1004	0.3112	0.2108
2	1	7	0.1004	0.3654	0.265
3	4	5	0.1015	0.3189	0.2174
4	5	6	0.1007	0.317	0.2163
5	6	1	0.1029	0.3039	0.201
6	7	4	0.1018	0.3072	0.2054
7	8	9	0.1018	0.3072	0.2054
8	9	10	0.1015	0.3189	0.2174
9	10	11	0.1036	0.3315	0.2279
10	11	14	0.1029	0.3039	0.201
11	13	8	0.1002	0.3183	0.2181
12	14	8	0.1004	0.9134	0.813

- R = Bobot fungsi pinalti
- Gamma = Koefisien penyerapan cahaya
- Beta0 = Koefisien daya tarik *firefly* saat jarak antar *firefly* nol
- Alpha = Koefisien gerak acak *firefly*

Setelah menentukan nilai parameter memasukan *input* dengan arus nominal sebesar 440 Ampere pada setiap bebannya. Hasil simulasi MATLAB R2019b dari optimasi koordinasi proteksi DOCR menggunakan algoritma firefly yang merupakan selisih waktu antara rele primer dan rele sekunder dari hasil Algoritma firefly ditampilkan pada Tabel 21 dan 22.

Dari Tabel 21 dan 22 dapat dilihat bahwa waktu operasi rele primer sesuai dengan constrain yang telah ditentukan yaitu <0.1sekon. sedangkan coordination time interval tiap rele primer dan juga sekunder juga menunjukkan nilai >0.2s. adanya CTI yang besar pada rele 13 dikarenakan arus hubung singkat maksimum pada feeder yang terdapat rele 13 mempunyai nilai arus hubung singkat yang kecil.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Tingkat konvergensi algoritma firefly terhitung cepat karena dari hasil percobaan, rata-rata nilai sudah konvergen pada iterasi ke 7 untuk konfigurasi mesh dan iterasi ke 8 untuk konfigurasi open-mesh dan radial.

Nilai total TDS dan waktu operasi hasil optimasi algoritma Firefly relatif lebih kecil dibandingkan perhitungan manual

Nilai rata-rata waktu operasi rele primer menggunakan Algoritma Firefly adalah sebesar 0,102 s.

CTI hasil perhitungan sudah mendekati target yang ditentukan yaitu pada konfigurasi mesh dengan error terbesar 1.12 detik dan pada konfigurasi open-mesh mempunyai error terbesar 0.8 detik.

B. Saran

Diperlukan studi kasus pada *plant* yang nyata sehingga tahu besar komponen lain seperti trafo, impedansi, dan lain lain.

Untuk mendapatkan nilai CTI yang lebih cepat diperlukan metode baru untuk memperbaiki Algoritma Firefly dalam proses optimasi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. K. Hakimi, "Optimasi Koordinasi Proteksi Rele Arah Arus Lebih pada Sistem Distribusi Mesh dengan Pembangkit Tersebar Menggunakan Algoritma Genetika," Institut Teknologi Sepuluh Nopember., Surabaya, 2016.
- [2] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book) - IEEE Standard*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2001.
- [3] P. M. Anderson, *Power System Protection*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [4] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 5th ed. Stamford, USA: Cengage Learning, 2012.
- [5] MERIN GERLIN, "Sepam 1000: Sepam Range Substations, Busbars, Transformers, Motors." MERIN GERLIN.
- [6] X. S. Yang and X. He, "Firefly algorithm: recent advances and applications," *Int. J. Swarm Intell.*, vol. 1, no. 1, p. 36, 2013, doi: 10.1504/ijsi.2013.055801.