

Optimasi Penempatan Kapasitor Pada Jaringan Transmisi Teling-Tomohon Menggunakan Kecerdasan Buatan

Jacklien Landang, Sartje Silimang, ST., MT., Maickel Tuegeh, ST., MT.
Jurusan Teknik Elektro-FT. UNSRAT, Manado-95115, Email: eqn_lan@yahoo.com

Abstrak - Jaringan transmisi pada sistem tenaga listrik berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit ke pusat beban membutuhkan suatu kondisi yang optimal. Dalam suatu sistem tenaga listrik, kapasitor dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya pada saluran transmisi. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan pemasangan kapasitor, sehingga mampu meningkatkan kualitas tegangan, memperbaiki faktor daya pada jaringan transmisi dengan menggunakan Kecerdasan Buatan. Dengan menggunakan metode algoritma gentika.

Saluran GI Tomohon – GI Teling (70 kV), tegangan pada sisi terima adalah 67,66 [kV]. Penempatan kapasitor dipasang pada ujung terima, dengan besar daya kapasitor 33 [MVAR] sehingga tegangan pada sisi terima naik sebesar 3,26% menjadi 69,86 [kV]. Saluran GI Lopana – GI Otam (150 [kV]), tegangan pada sisi terima adalah 129,315 [kV]. Penempatan kapasitor dipasang pada ujung terima, dengan besar daya kapasitor 200 [MVAR] sehingga tegangan pada sisi terima naik sebesar 13,79% menjadi 147,147 [kV].

Kata kunci: Algoritma Genetika, Daya Kapasitor, Kecerdasan Buatan, Penempatan Kapasitor.

Abstract - Transmission line of the power system serves as a means to distribute electrical energy generated from the plant to the load requires an optimum power condition. In a power system, electrical capacitor can be used to increase the power factor on the transmission line. This research aims to solve the problem of mounting the capacitor, so as to improve the voltage quality, improve the power factor on the transmission line by using artificial intelligence. By using genetic algorithm.

For the Tomohon –Teling transmission line (70[kV]), the voltage at receiving end of the substation is 67,66 [kV]. The capacitor placement, installed at the receiving end, the value of the power of capacitor is 33 [MVAR] and increase the voltage by 3,26%, so that the voltage become 69,68 [kV]. For the Lopana - Otam transmission line (150[kV]), the voltage of receiving end of the substation is 129,315 [kV]. The capacitor placement, installed at the receiving end, the value of the power of capacitor is 200 [MVAR] and increase the voltage by 13,79 %, so that the voltage become 147,147 [kV].

Keyword: Artificial Intelligence, Genetic Algorithm, Placement of Capacitor, Power of Capacitor.

I. PENDAHULUAN

Jaringan transmisi pada sistem tenaga listrik berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit ke pusat beban. Jaringan transmisi sebagai sarana untuk penyaluran daya membutuhkan suatu kondisi yang optimal. Daya yang dialirkan oleh jaringan transmisi memiliki dua komponenyaitu daya aktif dan daya reaktif. Daya reaktif pada sistem transmisi berpengaruh pada kualitas tegangan.

Daya reaktif disebabkan oleh impedansi dari saluran yang sebagian besar merupakan komponen reaktif. Daya reaktif juga menjadi konsumsi untuk peralatan listrik seperti motor, transformator dan peralatan elektronika daya. Bila suatu jaring transmisi tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh generator sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan transmisi. Apabila kebutuhan ini cukup besar maka arus yang mengalir di jaringan transmisi juga semakin besar yang akan berakibat pada penurunan faktor daya, peningkatan rugi jaringan dan jatuh tegangan pada ujung saluran meningkat, sehingga konsumen mendapat tingkat tegangan yang tidak sesuai. Sehingga hal ini akan menimbulkan kerugian baik bagi Perusahaan Listrik Negara (PLN) maupun konsumen.

Dalam suatu sistem tenaga listrik, kapasitor dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya pada saluran transmisi. Pemasangan kapasitor tidak bisa dilakukan secara sembarangan karena berpengaruh pada beberapa aspek seperti kontrol sistem, biaya dan batas tegangan sehingga diperlukan perhitungan yang tepat. Dengan demikian akan diperoleh suatu lokasi yang sesuai dan kapasitas yang optimal.

Sebagaimana yang telah diuraikan dari permasalahan di atas, maka penulis melakukan penelitian dengan judul *Optimasi Penempatan Kapasitor Pada Jaringan Transmisi Teling-Tomohon Dengan Menggunakan Kecerdasan Buatan.*

II. LANDASAN TEORI

A. Representasi Saluran Transmisi

Berdasarkan panjang saluran, saluran transmisi dibedakan dalam tiga bagian, yaitu saluran transmisi pendek dengan panjang saluran kurang lebih 80 [km], saluran transmisi menengah dengan panjang saluran kira-kira 80-240 [km] dan saluran transmisi panjang dengan panjang saluran kira-kira di atas 240 [km].

Gambar 1 menunjukkan sebuah generator dengan hubungan Y yang mencatu suatu beban seimbang melalui suatu saluran transmisi, dimana resistansi (R) dan induktansi (L) merupakan nilai-nilai untuk seluruh panjang saluran.

B. Kawat Penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (CU 97,5%) atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61 %).

Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut

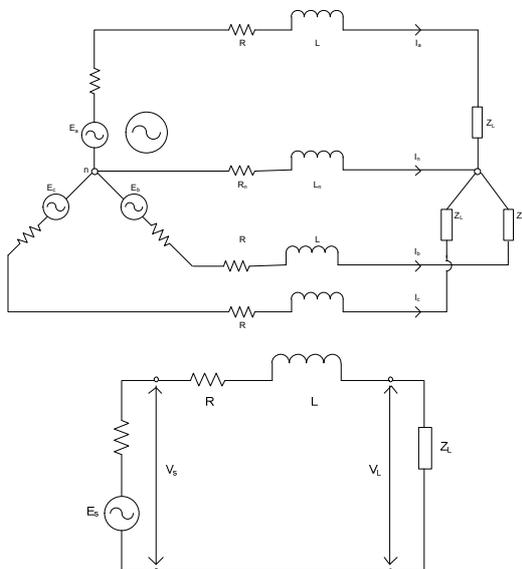
AAC = *All-Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

AAAC = *All-Aluminium-Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR = *Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

ACAR = *Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*Aluminium Alloy*). Untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antara dua tiang/ menara jauh (ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.



Gambar 1. Representasi saluran transmisi 3 fasa

A. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengirim (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerima (*receiving end*) tenaga listrik. Pada saluran bolak-balik besarnya tergantung dari impedansi dan admitansi saluran serta pada beban dan faktor daya. Jatuh tegangan diilustrasikan dengan fasor seperti pada gambar 2. Jatuh tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan (*voltage regulation*), dan dinyatakan oleh persamaan 1.

$$\frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana,

- V_s = Tegangan pada pangkal pengiriman
- V_r = Tegangan pada ujung penerimaan

Untuk jarak dekat regulasi tegangan hanya beberapa persen saja, tetapi untuk jarak sedang dan jauh dapat mencapai 5-15%.

Berdasarkan persentase jatuh tegangan didefinisikan sebagai persentase jatuh tegangan pada saluran dengan frekuensi tegangan pada sisi pengirim yang dinyatakan dalam persamaan 2.

$$(\Delta V)\% = \frac{(V_s - V_r)}{V_r} \times 100\% \quad (2)$$

Sehingga,

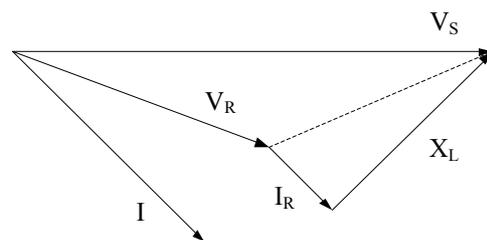
$$(\Delta V)\% = \frac{S \times L (R \cos \theta + j X \sin \theta)}{V^2} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana,

- S = Daya Semu [kVA]
- X = Reaktansi Saluran [Ω /km]
- R = Resistansi Saluran [Ω /km]
- L = Panjang Konduktor [km]
- V = Tegangan Antar Fasa [V]
- θ = Sudut Fasa

A. Impedansi Saluran

Impedansi saluran ini terdiri dari tahanan dan reaktansi induktif yang tersebar secara merata sepanjang saluran.



Gambar 2. Diagram Fasor Jatuh Tegangan

Tahanan

Keadaan fisik konduktor menentukan besarnya tahanan arus searah (DC) dari konduktor, yang berbanding lurus dengan tahanan jenis dan panjang konduktor dan terbalik dengan luas penampangnya, ini dapat dilihat pada persamaan 4.

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \tag{4}$$

Dimana

- R_{dc} = tahanan DC dari kawat
 - ρ = tahanan jenis pada suhu 20⁰ C
 - =0,0175 Ω mm²/m untuk tembaga
 - =0,0284 Ω mm²/m untuk aluminium
 - l = panjang kawat
 - A = luas penampang
- Karena umumnya kawat penghantar terdiri dari kawat pilin, maka sebagai faktor koreksi, untuk menghitung pengaruh dari pilin panjang kawat dikalikan 1,02 (2% dari faktor koreksi). Dalam batas temperatur 10⁰-100⁰ untuk kawat (Cu) dan aluminium (Al) berlaku persamaan 5, 6 dan 7.

$$R_{t2} = R_{t1} (1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)) \tag{5}$$

Jika,

$$\alpha_{t1} = \frac{1}{t_0 + t_1} \tag{6}$$

jadi,

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \tag{7}$$

dengan nilai-nilai T dapat dilihat pada tabel I.

Induktansi dan Reaktansi Induktif

Untuk menentukan induktansi dari masing-masing kawat penghantar dapat di nyatakan dengan persamaan 8.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \text{ [H/m] perfasa} \tag{8}$$

Karena bentuk dari gelombang arus dan tegangan adalah sinusoidal maka reaktansi induktifnya dapat dihitung menggunakan persamaan 9.

$$X_L = 2 \pi f L \text{ [\Omega/ km]} \tag{9}$$

Dimana:

- f = frekuensi
- L = induktansi

A. Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor Daya

Perbaikan kualitas tegangan yang turun akibat besarnya jatuh tegangan yang terjadi sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan sistem daya listrik. Salah satu cara adalah dengan pemasangan kapasitor daya pada jaringan sebagai pengaturan tegangan serta perbaikan faktor daya.

Untuk menghitung kenaikan tegangan digunakan persamaan 10.

$$\%VR = \frac{Q_C X_L L}{10 \times V_{LL}^2} \tag{10}$$

Dimana

- %VR = Persentase kenaikan tegangan [%]
- Q_C = Daya reaktif kapasitor [kVAR]
- V_{LL} = Tegangan Saluran [kV]
- X_L = Reaktansi Induktif [Ω /km]

III. METODOLOGI PENELITIAN

Sistem tenaga listrik Minahasa merupakan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menyediakan atau menyalurkan energi listrik dengan daerah pelayanan meliputi kotamadya Manado, Bitung, Minahasa Utara, Minahasa Selatan, Minahasa Induk, Minahasa Tenggara, dan Kotamobagu dimana sistem ini bekerja secara interkoneksi.

Sistem tenaga listrik Minahasa sendiri terdiri dari tiga jenis pusat tenaga listrik, yaitu Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD), yang terdiri atas PLTD Bitung, PLTD Lopana, PLTD Sewatama 1, PLTD Sewatama 2 dan PLTD Manado. Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA), yang terdiri atas: PLTA Tonsealama, PLTA Tanggari 1, dan PLTA Tanggari 2. Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTPB), yaitu PLTPB Lahendong I, PLTPB Lahendong II, PLTPB Lahendong III, PLTPB Lahendong IV.

Dalam melayani daerah beban sistem tenaga listrik Minahasa terdiri atas 10 buah gardu induk, yaitu GI. Ranomut, GI. Teling, GI. Sawangan, GI. Bitung, GI. Tonsealama, GI. Tomohon, GI. Kawangkoan, GI. Lopana, GI. Tasikria, GI. Otam.

Data Teknis

Data teknis yang digunakan pada perhitungan-perhitungan ditunjukkan pada tabel II dan III, serta gambar 4 dan gambar 5.

Algoritma Genetika

Operator-Operator Genetika

Tiga operator dasar yang sering digunakan dalam Algoritma Genetika adalah reproduksi, pindah silang (*Crossover*), dan mutasi. Dalam proses reproduksi, setiap individu populasi pada suatu generasi diseleksi berdasarkan nilai fitnessnya bereproduksi guna menghasilkan keturunan. Probabilitas terpilihnya suatu individu untuk bereproduksi adalah sebesar nilai fitness individu tersebut dibagi dengan jumlah nilai fitness seluruh individu dalam populasi.

TABEL I. HARGA T₀ DAN α UNTUK BAHAN KONDUKTOR STANDAR

Material	T ₀ °C	Koefisien temperatur dari tahanan x 10 ⁻³						
		α_0	α_{20}	α_{25}	α_{50}	α_{75}	α_{90}	α_{100}
Cu 100%	234,5	4,27	3,93	3,85	3,52	3,25	3,18	3,99
Cu 97,5 %	241,0	4,15	3,83	3,76	3,44	3,16	3,12	2,93
Al 61%	228,1	4,38	4,03	3,95	3,60	3,30	3,25	3,05

TABEL II. DATA TEKNIS SALURAN TRANSMISI

Nama Saluran	Z (% _m)		Z ₀ (% _m)		Panjang saluran (km)
	R (% _m)	X (% _m)	R ₀ (% _m)	X ₀ (% _m)	
GI.Bitung-GI.Sawangan	0,157	0,419	0,541	1,963	28,853
PLTA Tanggari 1-GI.Sawangan	0,136	0,494	0,541	1,613	5,896
PLTA Tanggari 2-GI.Sawangan	0,194	0,422	0,641	1,711	3,800
GI.Sawangan-GI.Ranomut	0,157	0,409	0,635	1,609	19,655
GI.Sawangan-GI.Tonsealاما	0,157	0,480	0,574	1,655	7,832
GI.Ranomut-GI.Teling	0,157	0,419	0,541	1,963	3,245
GI.Tomohon-GI.Teling	0,168	0,474	0,571	2,050	17,000
GI.Tonsealاما-GI.Tomohon	0,157	0,419	0,597	2,046	10,039
PLTA Tonselama-GI. Tonselama line2	0,299	0,347	0,595	2,988	0,400
PLTA Tonselama-GI. Tonselama line1	0,157	0,326	0,453	2,968	0,374
GI.Tomohon-GI.Tasikria	0,194	0,432	0,395	1,188	26,040
PLTPB Lahendong-GI.Tomohon	0,118	0,410	0,342	1,231	7,684
PLTPB Lahendong-GI.Kawangkoan	0,118	0,410	0,342	1,231	9,950
GI.Kawangkoan-GI.Lopana	0,118	0,460	0,316	1,193	22,165
GI.Lopana-GI.Otam	0,118	0,460	0,316	1,193	77,000

Pindah silang adalah proses pemilihan posisi string secara acak dan menukur karakter-karakter stringnya. Operator mutasi dioperasikan sebagai cara untuk mengembalikan materi genetik yang hilang. Melalui mutasi, individu baru dapat diciptakan dengan melakukan modifikasi terhadap satu atau lebih nilai gen pada individu yang sama. Mutasi mencegah kehilangan total materi genetika setelah reproduksi dan pindah silang.

Parameter-Parameter Genetika

Parameter-parameter genetika berperan dalam pengendalian operator-operator genetika yang digunakan dalam optimasi menggunakan Algoritma Genetika. Parameter genetika yang sering digunakan meliputi ukuran populasi (n), probabilitas pindah silang (P_c) dan probabilitas mutasi (P_m).

Fungsi Fitness

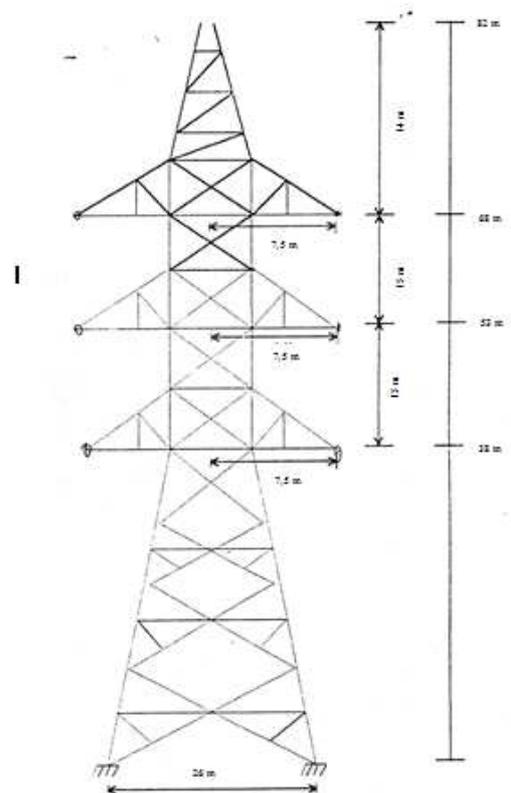
Dalam Algoritma genetika, fungsi fitness merupakan pemetaan fungsi objektif dari masalah yang akan diselesaikan. Setiap masalah yang berbeda yang akan diselesaikan memerlukan pendefinisian fungsi fitness yang berbeda. Misalkan fungsi objektif g(x) berupa fungsi besaran yang ingin diminimumkan, maka bentuk fungsi fitness f(x) dapat dinyatakan sebagai $f(x) = C_{max} - g(x)$, untuk $g(x) < C_{max} = 0$, untuk $g(x) \geq C_{max} = 1$. C_{max} dapat diambil sebagai koefisien masukan, misalnya nilai g terbesar yang dapat diamati, nilai g terbesar pada populasi saat ini, atau nilai g terbesar pada generasi terakhir.

Siklus Eksekusi Algoritma Genetika

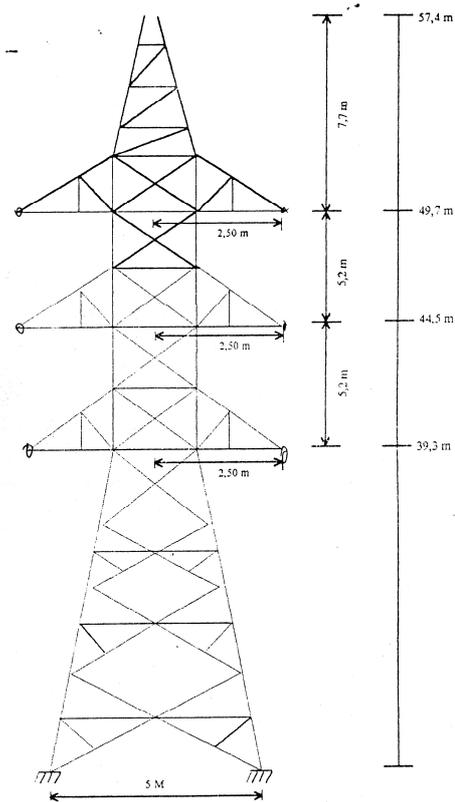
Dalam satu siklus iterasi (generasi) pada Algoritma genetika, terdapat dua tahap, yaitu tahap seleksi dan tahap rekombinasi. Tahap seleksi dilakukan dengan mengevaluasi kualitas setiap individu dalam populasi untuk mendapat peringkat kandidat solusi. Berdasarkan hasil evaluasi, selanjutnya dipilih individu-individu yang akan mengalami rekombinasi. Tahap rekombinasi meliputi proses-proses genetika untuk mendapat populasi baru kandidat-kandidat solusi.

TABEL III. DATA TEKNIS GENERATOR

Unit	Lokasi	Generator		
		Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	Xd' (p.u)
1	PLTD Sewa Unit 1	1.25	0.4	0.25
2	PLTD Sewa Unit 2	1.25	0.4	0.25
3	PLTD Sewa Unit 3	1.25	0.4	0.25
4	PLTD Sewa Unit 4	1.25	0.4	0.25
5	PLTD Sewa Unit 5	1.25	0.4	0.25
6	PLTD Sewa Unit 6	1.25	0.4	0.25
7	PLTD Sewa Unit 7	1.25	0.4	0.25
8	PLTD Sewa Unit 8	1.25	0.4	0.25
9	PLTD Sewa Unit 9	1.25	0.4	0.25
10	PLTD Sewa Unit 10	1.25	0.4	0.25
11	PLTD Sewa Unit 11	1.56	0.4	0.23
12	PLTD Sewa Unit 12	1.56	0.4	0.23
13	PLTD Sewa Unit 13	1.56	0.4	0.23
14	PLTD Sewa Unit 14	1.56	0.4	0.23
15	PLTD Bitung Unit 1	5.05	6.3	0.24
16	PLTD Bitung Unit 2	5.05	6.3	0.24
17	PLTD Bitung Unit 3	5.05	6.3	0.24
18	PLTD Bitung Unit 4	6.25	6.3	0.24
19	PLTD Bitung Unit 5	6.75	6.3	0.24
20	PLTD Bitung Unit 6	6.75	6.3	0.24
21	PLTD Bitung Unit 7	11.00	6.3	0.24
22	PLTD Bitung Unit 8	11.00	6.3	0.24
23	PLTD Bitung Unit 9	13.75	11	0.24
24	PLTA Tanggari 1 Unit 1	11.25	6.3	0.24
25	PLTA Tanggari 1 Unit 2	11.25	6.3	0.24
26	PLTA Tanggari2 Unit 1	11.88	6.6	0.26
27	PLTA Tanggari 2 Unit 2	11.88	6.6	0.26
28	PLTA Tonselama Unit 1	5.55	15	0.26
29	PLTA Tonselama Unit 2	5.63	6.3	0.26
30	PLTA Tonselama Unit 3	6.80	6.3	0.26
31	PLTPB Lahendong	25.00	11	0.26
34	PLTD Manado Unit 1	1.25	6.3	0.22
35	PLTD Manado Unit 2	1.25	6.3	0.22
36	PLTD Manado Unit 3	2.35	0.4	0.28
37	PLTD Manado Unit 4	2.35	0.4	0.28
38	PLTD Manado Unit 5	2.35	0.4	0.28
39	PLTD Lopana Unit 1	6.25	11	0.409
40	PLTD Lopana Unit 2	6.25	11	0.409



Gambar 4. Tiang Transmisi Teling-Tomohon



Gambar 5. Tiang Transmisi Lopana-Otam

Diagram Alir Penelitian (flowchart)

Flowchart program digunakan untuk menggambarkan alur logika program yang digunakan di dalam sistem. Gambar 6 menunjukkan flowchart pemrograman dengan Algoritma genetika.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. GI Teling-GI Tomohon

Saluran transmisi GI Teling – GI Tomohon menggunakan penghantar jenis ACSR 210mm² dengan jumlah urat 30Al/ 7St, dengan jarak antara penghantar D = 5,2m.

BesarTahananSaluranTransmisi GI Teling- GI Tomohon

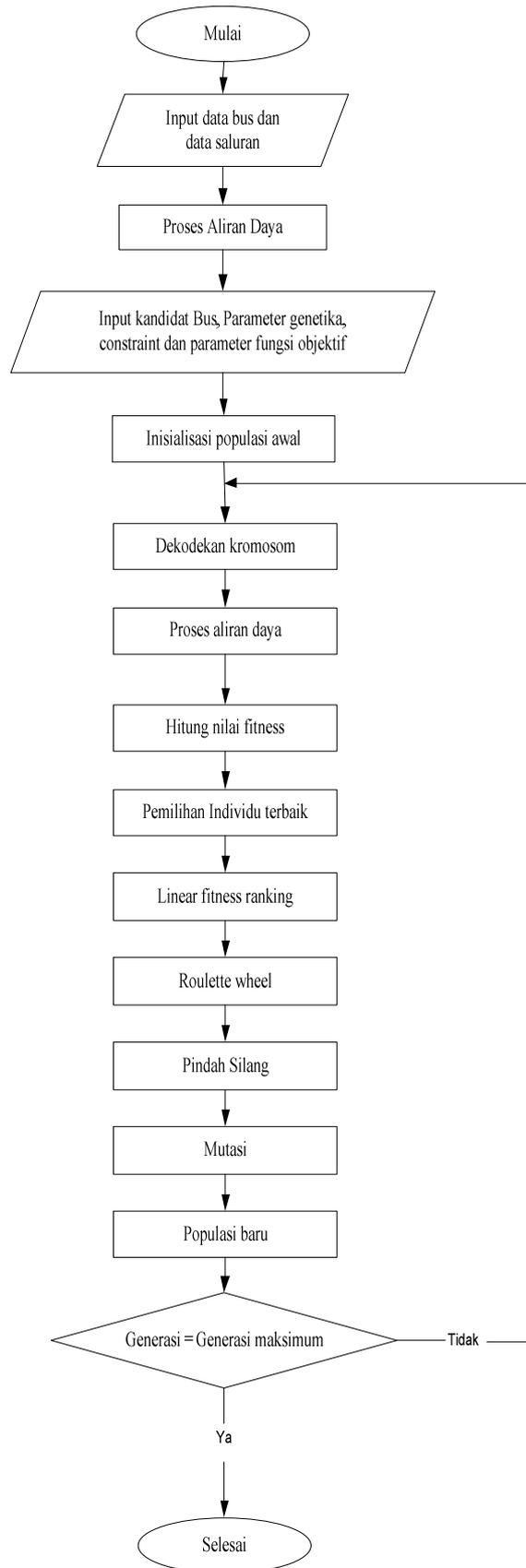
$$R_{t_2} = R_{t_1} \cdot \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1}$$

$$R_{t_2} = 0,1363 \cdot \frac{228,1 + 60}{228,1 + 20}$$

$$R_{t_2} = 0,1363 \times 1,161$$

$$R_{t_2} = 0,158 [\Omega / km]$$

Setelah perhitungan di lakukan, untuk mendapatkan nilai R_{ac} dilakukan dengan faktor koreksi (K=1,02),



Gambar 6. Diagram Alir Pemrograman

$$R_{ac} = KxR_{t2}$$

$$R_{ac} = 1,02 \times 0,158$$

$$R_{ac} = 0,161 [\Omega/km]$$

Nilai Reaktansi Saluran Transmisi GI Teling- GI Tomohon

Untuk menghitung nilai reaktansi kita dapat melihat konfigurasi tiang transmisi seperti pada gambar 7.

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \Omega / km$$

Konfigurasi saluran tower GI Teling – GI Tomohon

$$D_{ab} = D_{bc} = D_{c'b'} = D_{b'a'} = 5,2[m]$$

$$D_{ac'} = D_{bb'} = D_{ca'} = 5[m]$$

$$D_{ac} = D_{c'a'} = 10,4[m]$$

$$D_{ab'} = D_{bc'} = \sqrt{5^2 + 5,2^2} = 7,2139[m]$$

$$D_{aa'} = D_{bc'} = \sqrt{5^2 + 10,4^2} = 11,5395[m]$$

GMD antar fasa :

$$D_{bc}^P = D_{ab}^P = \sqrt[4]{(5,2 \times 7,2139)^2} = 6,1247 [m]$$

$$D_{ac}^P = \sqrt[4]{(10,4 \times 5)^2} = 7,2111 [m]$$

$$GMD = \sqrt[3]{6,1247 \times 6,1247 \times 7,2111} = 6,1247 [m]$$

Untuk memperoleh GMR dari rangkaian paralel, harus diketahui nilai-nilai GMR dari ke tiga posisi.

GMR untuk penghantar ASCR 30al/7st:

$$\begin{aligned} D_s &= 5,3744 \cdot r \\ &= 5,3744 \cdot \left(\frac{18,9}{2}\right) \\ &= 50,788 [mm] \\ &= 0,050788 [m] \end{aligned}$$

GMR untuk tiap kedudukan dari penghantar :

$$a - a' = \sqrt{11,5395 \times 0,050788} = 0,7654 m$$

$$b - b' = \sqrt{5 \times 0,05077296} = 0,5039 m$$

$$c - c' = \sqrt{11,5395 \times 0,050788} = 0,7654 m$$

$$\text{Maka } D_s^P = \sqrt{0,7654 \times 0,5039 \times 0,7654} = 0,6658 m$$

Gambar 7. Konfigurasi saluran tiang GI Teling – GI Tomohon

reaktansi rangkaian paralel :

$$\begin{aligned} X_L &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^3 \ln \frac{6,4673}{0,6658} \\ &= 0,1428 [\Omega/km/fase] \end{aligned}$$

Untuk rangkaian tunggal :

$$X_L = 2 \times 0,1428 = 0,2856 [\Omega/km/fase]$$

Resistansi pada temperatur 20°C = 0,161 [Ω/km]

Resistansi pada temperatur 60°C :

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{0,161 \times 228}{248} \\ &= 0,1480 [\Omega/km/fase] \end{aligned}$$

Impedansi saluran :

$$Z = 0,148 + j 0,2856 [\Omega/km/fase]$$

Nilai Impedansi Saluran

Setelah konstanta saluran dan impedansi persatuan panjang (kilometer) per fase di dapat, maka dapat dihitung besarnya impedansi saluran.

Saluran transmisi GI Tomohon – GI Teling adalah saluran ganda. Maka impedansinya adalah,

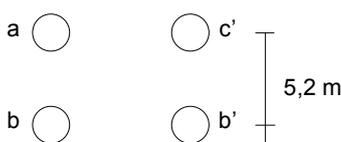
$$\begin{aligned} Z &= 0,5 (0,1480 + j 0,2856) \\ &= 0,074 + j 0,1428 [\Omega/km/fase] \end{aligned}$$

Panjang saluran transmisi adalah 17 km

$$\begin{aligned} Z &= 17 (0,074 + j 0,1428) \\ Z &= 1,258 + j 2,4276 [\Omega/fase] \\ Z &= \frac{1,258 + j 2,4276}{49 + j 0} = 0,0256 + j 0,0495 [pu] \end{aligned}$$

Jatuh Tegangan Sebelum Penambahan Kapasitor

Untuk Kapasitor yang diletakkan pada jarak 11,33 km dari sisi kirim.



$$(\Delta V)\% = \frac{S \times L(R\cos\theta + j X \sin \theta)}{v^2}$$

$$(\Delta V) = \frac{(0,06556.0,8 + j0,1849.0,6)}{70^2} (59 \times 11,33) 100\%$$

$$(\Delta V) = \frac{(0,0524 + 0,1109)}{4900} (668,67) 100\%$$

$$(\Delta V) = \frac{0,1633}{4900} (668,67) 100\%$$

$$(\Delta V) = (3.332 \times 10^{-5}) 668,67 \times 100\%$$

$$(\Delta V) = (2228 \times 10^{-5}) \times 100\%$$

$$(\Delta V) = 2,228\%$$

Tegangan Setelah Penambahan Kapasitor

$$\%VR = \frac{Q_C X_L L}{10 \times V^2}$$

$$Q_C = \frac{\%VR \times 10 \times V^2}{X_L \times L}$$

$$= \frac{2,228 \times 10 \times 68,44^2}{0,2856 \times 11,33}$$

$$= \frac{104360,27}{3,235}$$

$$= 32249,74 \text{ [kVAR]}$$

$$= 32000 \text{ [kVAR]}$$

$$= 32 \text{ [MVAR]}$$

$$\%VR = \frac{Q_C \times X_L \times L}{10 \times V^2}$$

$$= \frac{32000 \times 0,2856 \times 11,33}{10 \times 68,44^2}$$

$$= \frac{103547}{46840}$$

$$= 2,21\%$$

B. GI Lopana-GI Otam

Saluran transmisi GI Lopana – GI Otam menggunakan penghantar jenis ACSR 240 mm² dengan jumlah urat 26Al/ 7St, dengan jarak antara penghantar D = 15m

Besar Tahanan Saluran Transmisi GI Teling- GI Tomohon

$$R_{t_2} = R_{t_1} \cdot \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1}$$

$$R_{t_2} = 0,1183 \cdot \frac{228,1 + 60}{228,1 + 20}$$

$$R_{t_2} = 0,1183 \times 1,161$$

$$R_{t_2} = 0,137$$

Setelah perhitungan di lakukan, untuk mendapatkan nilai R_{ac} dilakukan dengan faktor koreksi (K=1,02), sebagai berikut:

$$R_{ac} = K \times R_{t_2}$$

$$R_{ac} = 1,02 \times 0,137$$

$$R_{ac} = 0,139 \text{ [}\Omega/\text{km]}$$

Nilai Reaktansi Saluran Transmisi GI Teling- GI Tomohon

Untuk menghitung nilai reaktansi kita dapat melihat konfigurasi tiang transmisi seperti pada gambar 8.

$$D_{ab} = D_{bc} = D_{c'b'} = D_{b'a'} = 15[m]$$

$$D_{ac'} = D_{bb'} = D_{ca'} = 15[m]$$

$$D_{ac} = D_{c'a'} = 30[m]$$

$$D_{ab'} = D_{bc'} = \sqrt{15^2 + 15^2} = 21,213[m]$$

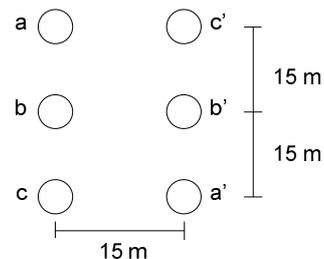
$$D_{aa'} = D_{cc'} = \sqrt{15^2 + 30^2} = 33,541[m]$$

GMD antar fasa :

$$D_{bc}^P = D_{ab}^P = \sqrt[4]{(15 \times 21,213)^2} = 17,838 \text{ [m]}$$

$$D_{ac}^P = \sqrt[4]{(30 \times 15)^2} = 21,213 \text{ [m]}$$

$$GMD = \sqrt[3]{17,838 \times 21,213 \times 17,838} = 18,899 \text{ [m]}$$



Gambar 8. Konfigurasi saluran tiang GI Teling – GI Tomohon

Resistansi : Pada temperatur $20^{\circ}\text{C} = 0,139 [\Omega/\text{km}]$
 Pada temperatur 60°C :

$$R_2 = \frac{0,139 \times 228}{248}$$

$$= 0,1278 [\Omega/\text{km}/\text{fase}]$$

$$= \frac{6,124 \times 10 \times 150^2}{0,1128 \times 51,33}$$

$$= \frac{1377900}{5,79}$$

Impedansi saluran :

$$Z = 0,1278 + j0,3386 [\Omega/\text{km}/\text{fase}]$$

$$= 237979,27 [\text{kVAR}]$$

$$= 200000 [\text{kVAR}]$$

$$= 200 [\text{MVAR}]$$

Nilai Impedansi Saluran

Saluran transmisi GI Lopana – GI Otam adalah saluran ganda. Maka impedansinya adalah,

$$Z = 0,5 (0,1278 + j 0,3386)$$

$$= 0,0639 + j 0,1693 [\Omega/\text{km}/\text{fase}]$$

Panjang saluran transmisi adalah 17 km

$$Z = 77 (0,0639 + j 0,1693)$$

$$= 4,9203 + j 13,0361 [\Omega/\text{fase}]$$

$$Z = \frac{4,9203 + j 13,0361}{49 + j0} = 0,1004 + j 0,266 [\text{pu}]$$

$$\%VR = \frac{Q_C \times X_L \times L}{10 \times V^2}$$

$$= \frac{200000 \times 0,1128 \times 51,33}{10 \times 150^2}$$

$$= \frac{1158004,8}{225000}$$

$$= 5,146\%$$

Jatuh Tegangan Sebelum Penambahan Kapasitor

Untuk Kapasitor yang diletakkan pada jarak 51,33 km dari sisi kirim.

$$(\Delta V)\% = \frac{S \times L (R \cos \theta + j X \sin \theta)}{V^2}$$

$$(\Delta V) = \frac{(R \cos \theta + j X \sin \theta)}{V^2} S \times L (\%)$$

$$= \frac{(0,0669 \cdot 0,8 + j 0,1773 \cdot 0,6)}{150^2} (168 \times 51,33) 100\%$$

$$= \frac{(0,0535 + 0,1063)}{22500} (8623,44) 100\%$$

$$= \frac{0,1598}{22500} (8623,44) 100\%$$

$$= (0,71 \times 10^{-5}) (8623,44) 100\%$$

$$= (6124 \times 10^{-5}) 100\%$$

$$= 6,124\%$$

Tegangan Setelah Penambahan Kapasitor

$$\%VR = \frac{Q_C \times X_L \times L}{10 \times V^2}$$

$$Q_C = \frac{\%VR \times 10 \times V}{X_L \times L}$$

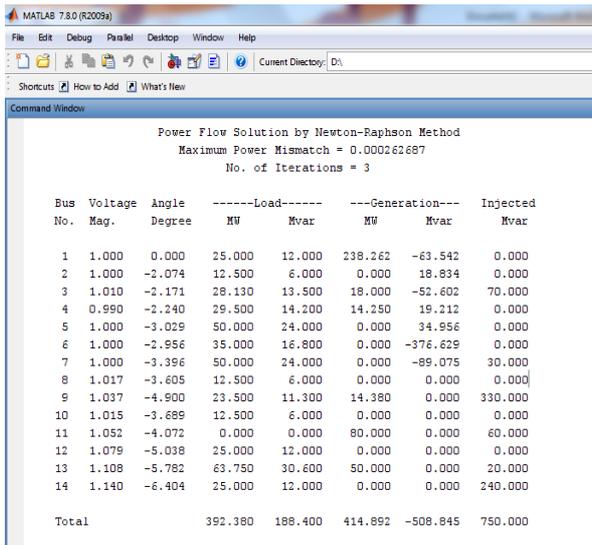
Dengan menggunakan perhitungan di atas, hasil yang didapat untuk analisa penempatan kapasitor pada jaringan transmisi GI Tomohon-GI Teling adalah, tegangan pada sisi terima adalah 67,66 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada jarak 11,33 [km] dari GI Tomohon, besar daya kapasitor 32 [MVAR] dan menaikkan Tegangan sebesar 2,21% menjadi 69,15 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada sisi terima, GI Teling, besar daya kapasitor 33 [MVAR] dan menaikkan tegangan sebesar 3,26% menjadi 69,86 [kV].

Untuk jaringan transmisi GI Lopana-GI Otam adalah, tegangan pada sisi terima adalah 129,315 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada jarak 51,33 [km] dari GI Lopana, besar daya kapasitor 200 [MVAR] dan menaikkan tegangan sebesar 6,124% menjadi 137,35 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada sisi terima, GI Otam, besar daya kapasitor 200 [MVAR] sehingga tegangan pada sisi terima naik sebesar 13,79% menjadi 147,147 [kV].

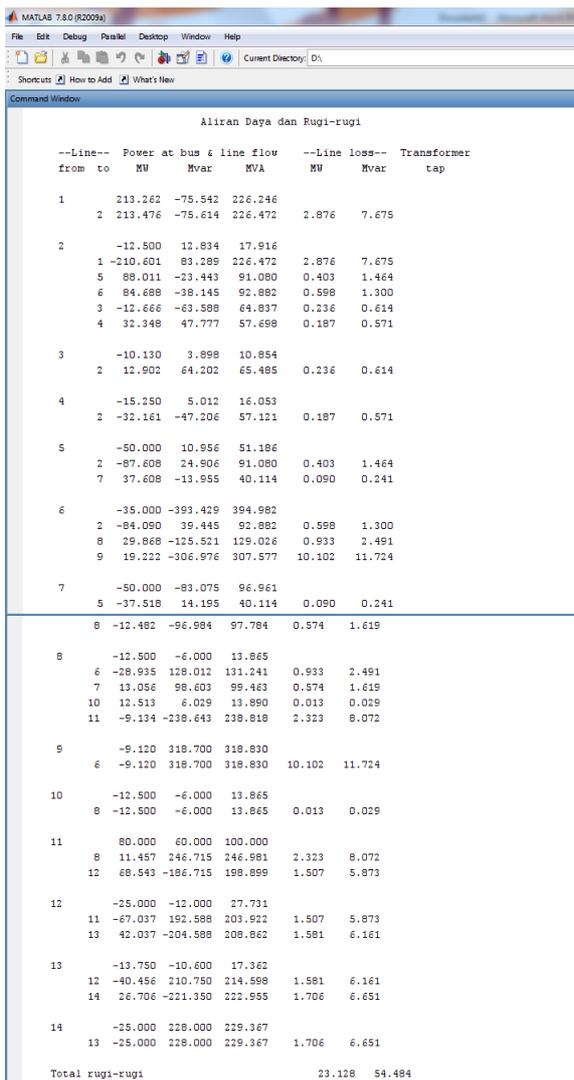
C. Perhitungan menggunakan Algoritma Genetika

Untuk menyelesaikan masalah peletakan bank kapasitor dengan menggunakan algoritma genetika, diambil 14 bus pada sistem Minahasa yaitu GI Bitung, GI Sawangan, PLTA Tanggari 1, PLTA Tanggari 2, GI Ranomuut, GI Tonsea lama, GI Teling, GI Tomohon, PLTA Tonsea Lama, GI Tasik ria, PLTP Lahendong, GI Kawangkoan, GI Lopana, GI Otam.

Dengan tampilan hasil pada gambar 9 dan 10. Pada bus 7, GI Teling ditempatkan kapasitor sebesar 30 [MVAR], dan pada bus 14, GI Otam ditempatkan kapasitor sebesar 240 [MVAR].



Gambar 9. Tampilan Hasil Perhitungan Aliran Daya



Gambar 10. Tampilan Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Daya

TABEL IV. HASIL PERHITUNGAN MANUAL DAN DENGAN ALGORITMA GENETIKA

Saluran	Perhitungan Manual	Perhitungan menggunakan Algoritma Genetika
GI Tomohon – GI Teling	33,728 [MVAR]	30 [MVAR]
GI Lopana – GI Otam	238,012 [MVAR]	240 [MVAR]

V. KESIMPULAN

Analisa penempatan kapasitor dilakukan dengan menghitung dari dua titik penempatan. Untuk saluran GI Tomohon – GI Teling, yaitu dilakukan pada jarak 2/3 dari sisi kirim, pada jarak ke 11,33 [km] dari sisi kirim GI Tomohon dan pada ujung sisi terima di GI Teling. Untuk saluran GI Lopana – GI Otam, dilakukan pada jarak 51,33 [km] dari sisi kirim GI Lopana dan pada ujung sisi terima GI Otam.

Saluran GI Tomohon – GI Teling (70 kV), tegangan pada sisi terima adalah 67,66 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada jarak 11,33 [km] dari GI Tomohon, besar daya kapasitor 32 [MVAR] dan menaikkan tegangan sebesar 2,21% sehingga tegangan pada sisi terima menjadi 69,15 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada sisi terima, GI Teling, besar daya kapasitor 33 [MVAR] sehingga tegangan pada sisi terima naik sebesar 3,26% menjadi 69,86 [kV].

Saluran GI Lopana – GI Otam (150 kV), tegangan pada sisi terima adalah 129,315 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada jarak 51,33 [km] dari GI Lopana, besar daya kapasitor 200 [MVAR] dan menaikkan tegangan sebesar 6,124% sehingga tegangan pada sisi terima menjadi 137,35 [kV]. Untuk penempatan kapasitor pada sisi terima, GI Otam, besar daya kapasitor 200 [MVAR] sehingga tegangan pada sisi terima naik sebesar 13,79% menjadi 147,147 [kV].

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, disimpulkan bahwa penempatan kapasitor yang optimal ditempatkan pada sisi terima saluran, agar tegangan yang pada sisi terima lebih besar, mendekati tegangan kirim.

Hasil perhitungan besar kapasitor secara manual dan perhitungan menggunakan algoritma genetika ditunjukkan pada tabel IV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, Mc Graw Hill, 1999.
- [2] I. Robandi, Desain Sistem Tenaga Modern, Jakarta: Erlangga, 2000.
- [3] L. Ratulangi, Kualitas tegangan sistem distribusi 34,5kV di Walio Petrochina International (Bermuda), LTD Sorong-Papua, Manado: Skripsi program studi S-1 Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi, 2006.
- [4] R. Hutabarat, Studi Perencanaan Penambahan Penyulang Dan Membagi Beban Pada Penyulang SK4 Di GI Kawangkoan, Manado: Skripsi program studi S-1 Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi, 2011.
- [5] Standar Perusahaan Listrik Negara, 1981.
- [6] T. Gonen, Electric of Power Distribution System Engineering, Mc Graw Hill, 1998.
- [7] T.S. Prof. Ir. Msc Hutauruk, Transmisi Daya Listrik, Jakarta: Erlangga, 1985.
- [8] W. D. Jr. Stevenson, Analisa Sistem Tenaga Listrik, Jakarta: Erlangga, 1984.