

KOMPENSASI KAPASITIF DENGAN INJEKSI DAYA REAKTIF UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI DAYA AKTIF PADA SISTEM DISTRIBUSI SKALA BESAR

Patria Julianto¹

¹Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹patria@borneo.ac.id

Abstract— In the power system, besides using the generator's active power (Watts), the consumers also use the generator's reactive power (VAr). It will cause a decrease in power factor and an increase in the total system current, which will cause a decrease in the voltage profile and increasingly active power losses. Therefore, in power systems with significant absorption of reactive power, the reactive power source must be compensated capacitively by injecting reactive power from outside the generators. One way to perform capacitive compensation is by installing capacitors in the power system. However, determining the exact location and sizes of the capacitors requires complex calculations because it involves many parameters in the power system and will be even more difficult if applied to a large-scale system. In this study, the Adaptive Genetic Algorithm (AGA) method was applied to determine the location and size of capacitors. AGA enhances the Genetic Algorithm (GA), which applies adaptive fitness values and adds the arithmetic mutation operation to the GA mutation process. The AGA method has been implemented on a large-scale distribution system (IEEE 118 bus), and the results are compared with other methods.

Keywords— Capacitive compensation, genetic algorithm, losses reduction, large-scale distribution system.

Intisari—Pada sistem tenaga listrik, konsumen selain menyerap daya aktif (Watt) juga menyerap daya reaktif (VAr). Namun demikian, jika beban menyerap daya reaktif dalam jumlah yang besar dari generator-generator yang paralel pada sistem, maka akan menyebabkan faktor daya turun, arus total menjadi lebih besar sehingga menyebabkan penurunan pada profil tegangan dan kenaikan pada rugi-rugi daya aktif. Oleh sebab itu, pada sistem tenaga listrik dengan penyerapan daya reaktif besar, sumber daya reaktif harus dikompensasi secara kapasitif dengan injeksi daya reaktif dari luar generator. Salah satu cara untuk melakukan kompensasi kapasitif adalah dengan instalasi kapasitor pada sistem tenaga listrik. Namun demikian, untuk menentukan lokasi dan nilai kapasitor yang tepat dibutuhkan perhitungan yang kompleks karena melibatkan banyak parameter pada sistem tenaga listrik dan akan bertambah sulit jika diterapkan pada sistem dengan skala yang besar. Pada penelitian ini, metode Adaptive Genetic Algorithm (AGA) diterapkan untuk penentuan lokasi dan ukuran kapasitor. AGA merupakan pengembangan dari metode Genetic Algorithm (GA) dengan penerapan nilai fitness yang adaptif dan penambahan operasi mutasi aritmetika pada proses mutasi yang terdapat pada GA. Metode AGA telah diimplementasikan pada sistem distribusi skala besar (IEEE 118 bus) dan hasilnya dibandingkan dengan metode lainnya.

Kata Kunci—Kompensasi kapasitif, genetic algorithm, reduksi rugi-rugi daya aktif, sistem distribusi skala besar.

I. PENDAHULUAN

Frekuensi dan tegangan merupakan parameter yang umumnya digunakan untuk menunjukkan kualitas pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik dengan kualitas yang baik tentunya akan selalu menjaga fluktuasi frekuensi dan tegangan. Untuk menjaga keseimbangan frekuensi, pengaturannya dapat dilakukan dengan cara menjaga keseimbangan daya aktif yang diserap oleh beban dan daya aktif yang dibangkitkan oleh generator ditambah dengan rugi-rugi daya aktif yang terdapat pada saluran. Sedangkan untuk tegangan, variasinya dipengaruhi oleh pengaturan sumber daya reaktif pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik umumnya memiliki beberapa sumber daya reaktif alternatif selain yang dihasilkan oleh eksitasi generator sinkron, seperti pengaturan tap transformator dan instalasi kompensator kapasitif. Terdapat beberapa pilihan untuk kompensator kapasitif, salah satu jenis kompensator kapasitif yang banyak digunakan adalah kapasitor. Kapasitor bekerja dengan cara menginjeksi daya reaktif pada sistem tenaga listrik agar dapat mengimbangi beban dengan penyerapan daya reaktif yang tinggi.

Kapasitor dapat secara cepat menjaga keseimbangan daya reaktif pada sistem tenaga listrik, sehingga instalasi kapasitor merupakan pilihan yang tepat pada beban dengan penyerapan daya reaktif tinggi. Namun demikian, untuk menentukan lokasi dan ukuran yang tepat dibutuhkan perhitungan yang kompleks karena melibatkan banyak parameter pada sistem tenaga listrik dan jika diterapkan pada sistem tenaga listrik dengan skala yang besar maka perhitungan akan bertambah sulit.

Penelitian tentang optimasi letak dan ukuran kapasitor khususnya pada sistem distribusi telah lama dan banyak dilakukan dengan teknik dan metode yang beragam dan dengan hasil yang juga bervariasi. Metode *mixed integer programming* berhasil diimplementasikan pada sistem distribusi dengan tipe radial [1], optimasi dengan cara menempatkan kapasitor satu per satu pada setiap bus bar dan selanjutnya ukuran kapasitor ditentukan dengan meminimalkan rugi-rugi daya yang merupakan fungsi objektif pada perhitungan [2]

Metode lainnya, baik dengan menggunakan pendekatan secara matematika maupun dengan kecerdasan buatan telah diimplementasikan untuk optimasi kapasitor antara lain: *Nonlinear Programming* [3], *Simulated Annealing* [4], *Tabu Search* [5], *Gravitational Search Algorithm* [6], *Big Bang-Big Crunch Optimization* [7], *Fuzzy Algorithm* [8], *Direct Search Algorithm* [9], *Harmony Search*

Algorithm [10], *Heuristic Algorithm* [11], *Teaching Learning Based Optimization* [12], *Plant Growth Simulation Algorithm* [13], *Flower Pollination Algorithm* [14], *Particle Swarm Optimization* [15], *Artificial Bee Colony* [16], *Ant Colony Search Algorithm* [17], *Cuckoo Search Algorithm* [18], *Bacterial Foraging Algorithm* [19], dan *Firefly Algorithm* [20].

Sedangkan optimasi kapasitor pada sistem distribusi dengan menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) telah berhasil dilakukan dengan hasil yang menjanjikan [21-22]. Namun demikian, jika diamati dari prosedur metode GA yang digunakan masih terdapat celah untuk memperbaiki prosedur tersebut, seperti pada proses untuk menghasilkan individu-individu terbaik pada sebuah generasi dilakukan prosedur crossover dan mutasi. Pada metode GA tersebut proses crossover dan mutasi masih menggunakan metode konvensional yang memproses semua individu, baik individu yang bugar maupun yang tidak bugar memiliki peluang yang sama untuk diubah gennya melalui proses crossover dan mutasi yang menyebabkan proses GA seringkali terjebak pada kondisi lokal minima yang menghasilkan konvergensi prematur, sehingga individu yang dihasilkan bukan merupakan individu terbaik, selain itu waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses komputasi relatif lama.

Pada penelitian ini, pengembangan metode GA dengan menerapkan proses GA yang adaptif atau dikenal dengan metode *Adaptive Genetic Algorithm* (AGA) diusulkan untuk proses optimasi kapasitor pada sistem distribusi. Pada metode AGA, proses crossover dan mutasi dibedakan berdasarkan kebugaran (*fitness*) individu-individu atau kromosom-kromosom yang terdapat pada setiap generasi. Individu yang bugar ditandai dengan nilai *fitness* yang tinggi melakukan pencarian lokal dan individu yang kurang bugar ditandai dengan nilai *fitness* yang rendah melakukan pencarian global.

Proses adaptif tersebut telah berhasil dilakukan dan terbukti dapat meningkatkan efisiensi pencarian lokal dan konvergensi prematur dapat dicegah. Adaptasi proses crossover dan mutasi berdasarkan kebugaran individu tersebut berhasil dilakukan karena pada setiap populasi dalam sebuah generasi tercipta keanekaragaman individu. Selain proses adaptasi tersebut, penelitian ini juga mengimplementasikan operasi mutasi aritmetika dengan tujuan untuk mengatasi permasalahan jarak hamming yang umum terjadi pada pengkodean dengan menggunakan bilangan biner.

Pada penelitian ini, untuk menentukan kompensasi kapasitif yang optimal pada sistem distribusi skala besar dilakukan dengan cara merepresentasikan letak dan ukuran kapasitor sebagai individu-individu yang terdapat dalam sebuah populasi. Selanjutnya, individu-individu tersebut akan mengalami proses GA dengan tujuan menghasilkan individu terbaik dalam setiap generasi. Proses GA akan terus dilakukan sampai generasi akhir (maksimum) dan individu yang terbaik pada generasi akhir dipilih sebagai solusi akhir, yaitu: letak dan ukuran kapasitor yang paling optimal. Kompensasi kapasitif berupa injeksi daya reaktif dari kapasitor (hasil dari optimasi) telah berhasil diujicoba pada sistem distribusi skala besar yaitu: IEEE 118-bus. Perbandingan hasil antara metode AGA dan metode GA juga disajikan pada penelitian ini.

II. LANDASAN TEORI

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mereduksi rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi. Rugi-rugi daya aktif yang paling minimal diperoleh berdasarkan fungsi objektif yang dapat dinyatakan dengan persamaan matematika berikut:

$$\min P_{D-loss} = \sum_{i=1}^{Nl} \Delta P_{l-i} \quad (1)$$

Perhitungan optimasi kompensasi kapasitif dengan injeksi daya reaktif dari kapasitor harus memenuhi batasan-batasan sistem distribusi sebagaimana persamaan maupun pertidaksamaan berikut ini:

$$g(x) = 0 \quad (2)$$

$$V_{min} \geq V_i \geq V_{maks} \quad (3)$$

$$S_i \leq S_{imaks} \quad (4)$$

Keterangan:

N_l : jumlah saluran distribusi;

P_{D-loss} : rugi-rugi daya aktif total;

ΔP_{l-i} : rugi-rugi daya aktif pada saluran i ;

x : vektor tegangan bus bar;

$g(x)$: aliran daya pada sistem distribusi;

V_i : besaran tegangan pada bus i ;

V_{min} : tegangan minimum bus bar;

V_{maks} : tegangan maksimum bus bar;

S_i : daya kompleks yang mengalir pada saluran i ;

S_{imaks} : kapasitas daya kompleks maksimum saluran i .

Pada penelitian ini, untuk mereduksi rugi-rugi daya aktif pada saluran distribusi digunakan fungsi objektif dengan menambahkan fungsi dan konstanta penalti untuk setiap pelanggaran yang dilakukan pada tahap perhitungan pada proses optimasi sebagaimana persamaan berikut:

$$\min P_{D-loss} = \sum_{i=1}^{Nl} \Delta P_{l-i} + k_1 f_v + k_2 f_c \quad (5)$$

Keterangan :

f_v : fungsi penalti untuk setiap pelanggaran pada batasan tegangan bus bar;

f_c : fungsi penalti untuk setiap pelanggaran pada batasan kapasitas daya kompleks saluran distribusi;

k_1, k_2 : konstanta penalti.

Sebagaimana fungsi objektif pada Persamaan (1), tujuan yang diharapkan dari proses optimasi adalah pengoperasian sistem distribusi dengan rugi-rugi daya aktif yang paling minimal dengan batasan-batasan yang terdapat pada saluran distribusi tidak ada yang dilanggar. Sehingga Persamaan (1) perlu ditambahkan beberapa fungsi dan konstanta sebagaimana Persamaan (5) untuk mencegah proses optimasi menghasilkan pengoperasian sistem distribusi dengan rugi-rugi daya aktif rendah namun terdapat pelanggaran terhadap batasan-batasan pada sistem distribusi.

III. METODE PENELITIAN

A. Genetic Algorithm (GA)

GA yang umum digunakan sebagai metode optimasi memiliki cara kerja yaitu: mencari titik optimal secara paralel menggunakan prosedur genetika dan dengan populasi berupa deretan angka-angka baik dalam bentuk bilangan nyata maupun biner. Prosedur GA diawali dengan pembentukan individu berupa deretan angka-angka yang disebut dengan gen dan alam penelitian ini menggunakan angka-angka dalam bentuk bilangan biner (0,1). Individu-individu dalam suatu populasi merupakan kandidat dari solusi yang jumlahnya konstan. Langkah berikutnya adalah individu-individu dalam suatu populasi akan mengalami prosedur genetika seperti: crossover dan mutasi sehingga populasi tersebut akan mengalami perkembangan pada generasi berikutnya. Langkah selanjutnya merupakan penentuan populasi untuk generasi selanjutnya, yang dilakukan melalui proses evaluasi dan seleksi terhadap individu-individu dalam populasi. Proses ini akan berhenti sampai dengan generasi terakhir yang ditentukan.

Pada proses evolusi genetika, individu yang sehat/bugar memiliki prosentase yang lebih besar untuk menghasilkan keturunan yang bugar juga dan menghasilkan lebih banyak keturunan serta dapat bertahan pada generasi berikutnya.

Pada penelitian ini terdapat tiga prosedur/langkah yang digunakan dalam proses GA, yaitu:

1) Seleksi

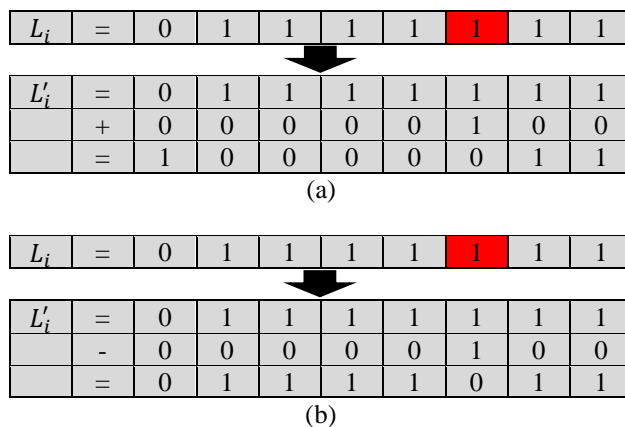
Pada penelitian ini seleksi yang digunakan adalah seleksi *roulette-wheel*. Prosedur pada seleksi jenis ini cukup sederhana, dua individu dipilih sebagai orang tua. Setiap individu memiliki kebugaran berbeda-beda yang ditunjukkan oleh nilai fitness masing-masing individu. Individu yang bugar memiliki nilai fitness yang tinggi sehingga memiliki peluang lebih besar untuk dipilih menjadi orang tua, demikian sebaliknya individu yang tidak bugar memiliki nilai fitness rendah memiliki peluang lebih kecil untuk dipilih sebagai orang tua. Proses seleksi akan dilakukan terus menerus pada populasi dalam setiap generasi sampai generasi akhir.

2) Crossover

Crossover merupakan perkawinan silang dua individu yang telah dipilih sebagai orang tua dan dari perkawinan tersebut akan menghasilkan keturunan yang diwariskan gen dari orang tua. Pada langkah crossover, struktur pada setiap individu yang dihasilkan memiliki struktur hasil rekombinasi dari orang tua. Proses crossover juga sangat menentukan kecepatan dari konvergensi pada proses optimasi. Probabilitas yang digunakan untuk prosedur crossover umumnya memiliki nilai yang tinggi (0,6-0,9).

3) Mutasi

Mutasi merupakan prosedur pada GA yang bertugas untuk mengubah gen pada kromosom/individu. Individu akan diinjeksikan gen yang berbeda pada strukturnya. Pada prosedur mutasi ini probabilitas yang digunakan memiliki nilai yang kecil (0,0001-0,001), dan individu yang terpilih gennya akan diubah nilainya dari 0 ke 1 atau sebaliknya. Dengan proses mutasi ini, karakteristik pada individu yang dimutasi akan berbeda dengan karakter yang terdapat dalam populasi orang tua.



■ : Posisi mutasi.

Gambar 1. Operasi Mutasi Aritmetika

(a) Operasi Penambahan; (b) Operasi Pengurangan

B. Pengkodean GA

Pada penelitian ini, pengkodean GA menggunakan struktur bilangan biner yang merepresentasikan solusi-solusi optimasi berupa lokasi dan ukuran kapasitor. Sedangkan untuk pendekodean bilangan biner GA menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$X_i = A + \frac{B - A}{2^l - 1} \sum_{j=1}^l b_{ij} 2^{j-1} \quad (6)$$

Keterangan:

X_i : nilai variabel dari hasil i ;

A, B : batas bawah dan batas atas variabel;

l : panjang struktur biner;

b_{ij} : nilai (0 atau 1) pada hasil i dari gen j ;

2^{j-1} : koefisien pendekodean dari gen j .

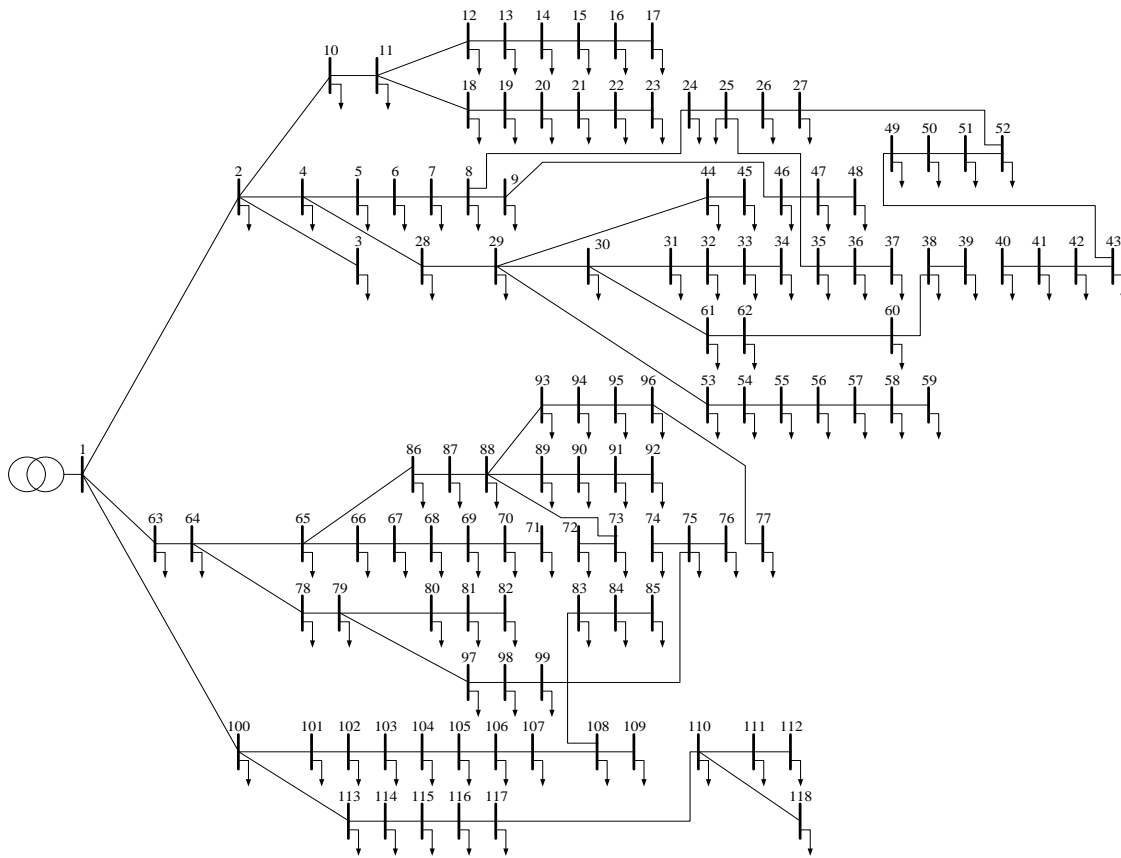
C. Prosedur Adaptive Genetic Algorithm (AGA)

Pada metode AGA, proses crossover dan mutasi dilakukan secara adaptif berdasarkan kebugaran (fitness) individu atau kromosom yang terdapat pada setiap generasi. Individu yang bugar ditandai dengan nilai fitness yang tinggi melakukan pencarian lokal dan individu yang kurang bugar ditandai dengan nilai fitness yang rendah melakukan pencarian global. Proses adaptif tersebut telah berhasil dilakukan dan terbukti dapat meningkatkan efisiensi pencarian lokal dan konvergensi prematur dapat dicegah.

Untuk menyesuaikan konsep adaptif pada prosedur crossover dan mutasi, maka panjang langkah pencarian pada struktur biner individu pada prosedur crossover (N_c) dan mutasi (N_m) berubah secara adaptif berdasarkan nilai fitness individu-individu dalam populasi sebagaimana Persamaan (7) dan (8) berikut:

$$N_c = \begin{cases} \left(c_1 \frac{f_{maks} - f'_i}{f_{maks} - f_{ave}} + c_2 \right) (l - 1) & f'_i > f \\ l - 1 & f'_i \leq f \end{cases} \quad (7)$$

$$N_m = \begin{cases} \left(m_1 \frac{f_{maks} - f_i}{f_{maks} - f_{ave}} + m_2 \right) l & f_i > f \\ l - 1 & f_i \leq f \end{cases} \quad (8)$$



Gambar 2. Single Line Diagram Sistem Distribusi IEEE-118 Bus

Keterangan:

- c_1, c_2 : konstanta panjang langkah crossover;
- m_1, m_2 : konstanta panjang langkah mutasi;
- f_{max} : nilai fitness maksimum individu pada suatu populasi;
- f_i' : nilai fitness tertinggi dari dua individu yang dicrossover;
- f_i : nilai fitness individu yang dimutasi;
- f_{ave} : nilai fitness rata-rata individu pada suatu populasi.

Selain proses adaptasi tersebut, penelitian ini juga mengimplementasikan operasi mutasi aritmetika dengan tujuan untuk mengatasi permasalahan jarak hamming yang umum terjadi pada pengkodean dengan menggunakan bilangan biner. Posisi crossover (C_p), dan mutasi (M_p) pada individu ditentukan menggunakan Persamaan (9).

$$\begin{cases} C_p = \mathbf{rand}(N_c) \\ M_p = \mathbf{rand}(N_m) \end{cases} \quad (9)$$

dengan **rand** merupakan pemrosesan secara acak.

Jarak hamming pada pengkodean dapat mempengaruhi kinerja pencarian GA. Struktur kode biner yang ditentukan, misalnya: $L_i = 01111111$, untuk mengubahnya menjadi $L'_i = 10000000$ prosesnya sangat sulit walaupun hanya berbeda satu bit jika menggunakan prosedur operasi crossover dan mutasi konvensional. Dengan demikian, perlu prosedur khusus untuk mengatasi permasalahan tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.

Pada penelitian ini, optimasi kompensasi kapasitif dengan AGA, lokasi dan ukuran kapasitor dikodekan ke dalam deretan-deretan biner dengan mekanisme posisi tunggal crossover dan mutasi diimplementasikan pada prosedur crossover dan mutasi.

D. Desain Optimasi Kompensasi Kapasitif Pada Sistem Distribusi

Fungsi fitness yang merupakan fungsi untuk menunjukkan kinerja dari proses GA. Prosedur pada GA adalah mencari nilai fitness yang paling maksimum, sedangkan pada optimasi kompensasi kapasitif tujuannya adalah mencari solusi dengan hasil rugi-rugi daya aktif yang paling minimal sehingga fungsi fitness pada optimasi kompensasi kapasitif pada sistem distribusi perlu diubah dengan fungsi objektif dijadikan penyebut sebagaimana Persamaan (10) berikut:

$$F(x) = \frac{C_m}{F_{obj}(g)} \quad (10)$$

dengan nilai $C_m = 5 \times P_{o-loss}$, dan P_{o-loss} adalah rugi-rugi daya aktif jaringan distribusi pada kondisi awal (asli), g adalah individu hasil GA dan F_{obj} adalah nilai fungsi objektif sebagai Persamaan (5).

Dari persamaan (10) dapat terlihat bahwa didapatkan bahwa rugi-rugi daya aktif terbesar adalah individu dengan nilai fitness tertinggi pada populasi di akhir generasi. Hal tersebut menandakan tujuan yang diharapkan pada optimasi kompensasi kapasitif yaitu mereduksi rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi tercapai.

Tabel I
Data Sistem IEEE-118 Bus

No	Saluran		Impedansi		Daya	
	Dari	Ke	R (Ω)	X (Ω)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0,036	0,013	133,840	101,140
2	2	3	0,033	0,012	16,214	11,292
3	2	4	0,045	0,016	34,315	21,845
4	4	5	0,015	0,054	73,016	63,602
5	5	6	0,015	0,054	144,200	68,604
6	6	7	0,015	0,013	104,470	61,725
7	7	8	0,018	0,014	28,547	11,503
8	8	9	0,021	0,063	87,560	51,073
9	2	10	0,166	0,134	198,200	106,770
10	10	11	0,112	0,079	146,800	75,995
11	11	12	0,187	0,313	26,040	18,687
12	12	13	0,142	0,151	52,100	23,220
13	13	14	0,180	0,118	141,900	117,500
14	14	15	0,150	0,045	21,870	28,790
15	15	16	0,160	0,180	33,370	26,450
16	16	17	0,157	0,171	32,430	25,230
17	11	18	0,218	0,285	20,234	11,906
18	18	19	0,118	0,185	156,940	78,523
19	19	20	0,160	0,196	546,290	351,400
20	20	21	0,120	0,189	180,310	164,200
21	21	22	0,120	0,079	93,167	54,594
22	22	23	1,410	0,723	85,180	39,650
23	23	24	0,293	0,135	168,100	95,178
24	24	25	0,133	0,104	125,110	150,220
25	25	26	0,178	0,134	16,030	24,620
26	26	27	0,178	0,134	26,030	24,620
27	4	28	0,015	0,030	594,560	522,620
28	28	29	0,012	0,028	120,620	59,117
29	29	30	0,120	0,277	102,380	99,554
30	30	31	0,210	0,243	513,400	318,500
31	31	32	0,120	0,054	475,250	456,140
31	32	33	0,178	0,234	151,430	136,790
33	33	34	0,178	0,234	205,380	83,302
34	34	35	0,154	0,162	131,600	93,082
35	30	61	0,187	0,261	448,400	369,790
36	61	62	0,133	0,099	440,520	321,640
37	29	44	0,330	0,194	112,540	55,134
38	44	45	0,310	0,194	53,963	38,998
39	45	46	0,130	0,194	393,050	342,600
40	46	47	0,280	0,150	326,740	278,560
41	47	48	1,180	0,850	536,260	240,240
42	48	49	0,420	0,244	76,247	66,562
43	49	50	0,270	0,097	53,520	39,760
44	50	51	0,339	0,122	40,328	31,964
45	51	52	0,270	0,178	39,653	20,758
46	35	36	0,210	0,138	66,195	42,361
47	36	37	0,120	0,079	73,904	51,653
48	37	38	0,150	0,099	114,770	57,965
49	38	39	0,150	0,099	918,370	1205,100
50	39	40	0,240	0,158	210,300	146,660
51	40	41	0,120	0,079	66,680	56,608
52	41	42	0,405	0,146	42,207	40,184
53	41	43	0,405	0,146	433,740	283,410
54	29	53	0,391	0,141	62,100	26,860
55	53	54	0,406	0,146	92,460	88,380
56	54	55	0,406	0,146	85,188	55,436

No	Saluran		Impedansi		Daya	
	Dari	Ke	R (Ω)	X (Ω)	Dari	Ke
57	55	56	0,706	0,546	345,300	332,400
58	56	57	0,338	0,122	22,500	16,830
59	57	58	0,338	0,122	80,551	49,156
60	58	59	0,207	0,075	95,860	90,758
61	59	60	0,247	0,892	62,920	47,700
62	1	63	0,028	0,042	478,800	463,740
63	63	64	0,117	0,202	120,940	52,006
64	64	65	0,255	0,092	139,110	100,340
65	65	66	0,210	0,076	391,780	193,500
66	66	67	0,383	0,138	27,741	26,713
67	67	68	0,504	0,330	52,814	25,257
68	68	69	0,406	0,146	66,890	38,713
69	69	70	0,962	0,761	467,500	395,140
70	70	71	0,165	0,060	594,850	239,740
71	71	72	0,303	0,109	132,500	84,363
72	72	73	0,303	0,109	52,699	22,482
73	73	74	0,206	0,144	869,790	614,775
74	74	75	0,233	0,084	31,349	29,817
75	75	76	0,591	0,177	192,390	122,430
76	76	77	0,126	0,045	65,750	45,370
77	64	78	0,559	0,369	238,150	223,220
78	78	79	0,186	0,123	294,550	162,470
79	79	80	0,186	0,123	485,570	437,920
80	80	81	0,260	0,139	243,530	183,030
81	81	82	0,154	0,148	243,530	183,030
82	82	83	0,230	0,128	134,250	119,290
83	83	84	0,252	0,106	22,710	27,960
84	84	85	0,180	0,148	49,513	26,515
85	79	97	0,160	0,182	383,780	257,160
86	97	98	0,200	0,230	49,640	20,600
87	98	99	0,160	0,393	22,473	11,806
88	65	86	0,669	0,241	62,930	42,960
89	86	87	0,266	0,123	30,670	34,930
90	87	88	0,266	0,123	62,530	66,790
91	88	89	0,266	0,123	114,570	81,748
92	89	90	0,266	0,123	81,292	66,526
93	90	91	0,233	0,115	31,733	15,960
94	91	92	0,496	0,138	33,320	60,480
95	88	93	0,196	0,180	531,280	224,850
96	93	94	0,196	0,180	507,030	367,420
97	94	95	0,187	0,122	26,390	11,700
98	95	96	0,075	0,318	45,990	30,392
99	1	100	0,063	0,027	100,660	47,572
100	100	101	0,150	0,234	456,480	350,300
101	101	102	0,135	0,089	522,560	449,290
102	102	103	0,231	0,120	408,430	168,460
103	103	104	0,447	0,161	141,480	134,250
104	104	105	0,163	0,059	104,430	66,024
105	105	106	0,330	0,099	96,793	83,647
106	106	107	0,156	0,056	493,920	419,340
107	107	108	0,382	0,137	225,380	135,880
108	108	109	0,163	0,059	509,210	387,210
109	109	110	0,382	0,137	188,500	173,460
110	110	118	0,245	0,088	918,030	898,550
111	110	111	0,209	0,075	305,080	215,370
112	111	112	0,230	0,083	54,380	40,970
113	100	113	0,610	0,220	211,140	192,900
114	113	114	0,187	0,127	67,009	53,336

No	Saluran		Impedansi		Daya	
	Dari	Ke	R (Ω)		Dari	Ke
115	114	115	0,373	0,246	162,070	90,321
116	115	116	0,405	0,367	48,785	29,156
117	116	117	0,489	0,438	33,900	18,980

E. Data Sistem Pengujian

Pada penelitian ini komputer yang digunakan memiliki spesifikasi: processor Intel Core i7 2,11 GHz dan RAM 16 GB dan software yang digunakan adalah Matlab. Sedangkan data sistem distribusi yang digunakan adalah sistem IEEE 118-bus yang terdiri dari 118 bus dan 117 saluran, tegangan sistem distribusi 11 kV, dan daya total pada beban sebesar 22709,72 kW + j 17041,068 kVAr. Untuk single line diagram dapat dilihat pada Gambar 2. sedangkan data pembebanan dan impedansi saluran dapat dilihat pada Tabel I.

Parameter-parameter yang digunakan untuk proses optimasi kompensasi kapasitif pada sistem distribusi 118-bus adalah sebagai berikut: jumlah generasi maksimal 4000, jumlah populasi 80, probabilitas crossover 0,9, probabilitas mutasi 0,01, konstanta panjang pencarian mutasi $m_1 = 0,5$ dan $m_2 = 0,3$, konstanta panjang pencarian crossover $c_1 = 0,5$ dan $c_2 = 0,5$ dan panjang kromosom 10 (kolom pertama mewakili status kapasitor (1 : terpasang, 0 : tidak terpasang) dan kolom kedua sampai sembilan mewakili ukuran kapasitor). Semua bus kecuali slack bus menjadi kandidat untuk ditempatkan kapasitor, sehingga pada sistem distribusi 118-bus terdapat 117 kandidat bus untuk penempatan kapasitor. Sehingga setiap kromosom dapat dibentuk menjadi sebuah matriks yang terdiri dari 117 baris dan 10 kolom.

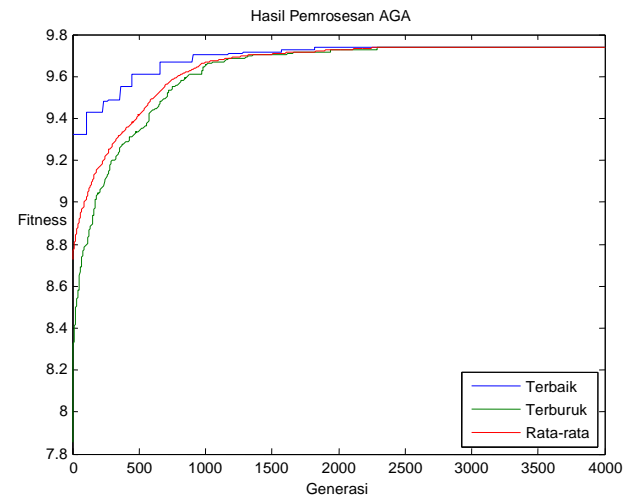
Ukuran kapasitor sebesar 150 kVAr, setiap bus dapat dipasang maksimal 6 kapasitor pada setiap bank kapasitor, sehingga ukuran bank kapasitor pada setiap bus maksimal dibatasi 900 kVAr. Nilai tegangan dibatasi antara minimal 0,9 pu dan maksimal 1,1 pu, dengan konstanta $k_1 = 1.000.000$. Sedangkan kapasi-tas saluran dibatasi pada nilai maksimum 10.000 kVA, dengan konstanta $k_2 = 1000$.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi optimasi kompensasi kapasitif didapatkan nilai fitness terbaik sebesar 9,7495. Untuk hasil pemrosesan AGA dari generasi ke generasi dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan untuk individu terbaik yang tersusun dalam matriks (117x10) yang disederhanakan lagi menjadi seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 didapatkan bahwa kapasitor terpasang pada bus bar 3, 29, 30, 33, 39, 40, 44, 46, 50, 56, 60, 61, 63, 76, 85, 89, 96, 98 111 dan 118. Untuk mendapatkan solusi dari permasalahan penentuan lokasi dan ukuran kapasitor, maka perlu dilakukan pendekodean pada kromosom terbaik ini menggunakan Persamaan (6), dengan batas bawah kapasitor sebesar 0 kVAr dan batas atas kapasitor sebesar 900 kVAr. Sehingga untuk nilai hasil pendekodean antara 0 sampai 150 kapasitor yang terpasang sebesar 150 kVAr, nilai 151 sampai 300 kapasitor yang terpasang sebesar 300 kVAr, nilai 301 sampai 450 kapasitor yang terpasang sebesar 450 kVAr, nilai 451 sampai 600 kapasitor yang terpasang sebesar 600 kVAr,

nilai 601 sampai 750 kapasitor yang terpasang sebesar 750 kVAr dan nilai 751 sampai 900 kapasitor yang terpasang sebesar 900 kVAr.



Gambar 3. Grafik Hasil Pemrosesan AGA Pada Sistem Distribusi IEEE 118-bus

Beberapa perhitungan pendekodean menggunakan Persamaan (6) pada individu dengan struktur biner sebagaimana Tabel 2 sebagai berikut:

- 1) Pada bus 3:

$$Q_{c3} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^8 + 2^7 + 2^1) = 679,843$$

Sehingga pada bus 3 terpasang kapasitor sebesar 750 kVAr.

- 2) Pada bus 29:

$$Q_{c29} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^7 + 2^6 + 2^4 + 2^1) = 369,863$$

Sehingga pada bus 29 terpasang kapasitor sebesar 450 kVAr.

- 3) Pada bus 30:

$$Q_{c30} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^8 + 2^7 + 2^6 + 2^5) = 845,401$$

Sehingga pada bus 30 terpasang kapasitor sebesar 900 kVAr.

- 4) Pada bus 33:

$$Q_{c33} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^6 + 2^5 + 2^2 + 2^0) = 177,886$$

Sehingga pada bus 33 terpasang kapasitor sebesar 300 kVAr.

- 5) Pada bus 39:

$$Q_{c39} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^8 + 2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^3 + 2^1) = 863,014$$

Sehingga pada bus 39 terpasang kapasitor sebesar 900 kVAr.

6) Pada bus 40:

$$Q_{c40} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^7 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^1) = 327,593$$

Sehingga pada bus 40 terpasang kapasitor sebesar 450 kVAr.

7) Pada bus 44:

$$Q_{c44} = 0 + \frac{900 - 0}{2^9 - 1} (2^5 + 2^2) = 63,405$$

Sehingga pada bus 44 terpasang kapasitor sebesar 150 kVAr.

Perhitungan yang sama dilakukan untuk bus-bus lainnya yang berstatus 1, sehingga akan didapatkan lokasi dan ukuran kapasitor hasil optimasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Setelah didapatkan lokasi dan ukuran kapasitor, maka kapasitor-kapasitor tersebut akan menginjeksikan daya reaktif pada sistem distribusi 118-bus. Untuk melihat pengaruh dari pemasangan kapasitor-kapasitor tersebut, maka simulasi aliran daya perlu dilakukan lagi.

Setelah dilakukan optimasi dengan AGA didapatkan bahwa untuk memperbaiki sistem, total kapasitor yang dipasang sebesar 10.050 kVAr dengan posisi kapasitor dipasang pada bus-bus tertentu. Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan optimasi adalah sebesar 537,7656 detik.

Hasil perhitungan pada sistem distribusi 118-bus terdiri dari perhitungan sebelum optimasi dan setelah optimasi. Hasil perhitungan setelah optimasi juga dibandingkan dengan metode *Genetic Algorithm* (GA). Perbandingan hasil optimasi penentuan lokasi dan ukuran kapasitor dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan untuk parameter biaya tidak disertakan pada perbandingan ini.

Tabel II

Lokasi dan Ukuran Kapasitor Hasil Optimasi Pada Sistem Distribusi 118-bus

No.	Lokasi Kapasitor (Bus)	Ukuran Kapasitor (kVAr)
1	3	750
2	29	450
3	30	900
4	33	300
5	39	900
6	40	450
7	44	150
8	46	750
9	50	150
10	56	750
11	60	450
12	61	750
13	63	300
No.	Lokasi Kapasitor (Bus)	Ukuran Kapasitor (kVAr)

14	76	300
15	85	150
16	89	600
17	96	300
18	98	450
19	111	600
20	118	600
Total		10050

Tabel III
Perbandingan Hasil Simulasi

Optimasi dengan GA		Optimasi dengan AGA	
Bus	Ukuran Kapasitor	Bus	Ukuran Kapasitor
4	750	3	750
11	900	29	450
21	900	30	900
32	750	33	300
33	600	39	900
36	900	40	450
39	750	44	150
41	750	46	750
53	450	50	150
57	450	56	750
60	600	60	450
64	750	61	750
72	150	63	300
76	600	76	300
77	600	85	150
84	600	89	600
107	150	96	300
110	300	98	450
116	750	111	600
		118	600
Total kVAr	11700	Total kVAr	10050
Rugi-rugi (kW)	649,78	Rugi-rugi (kW)	643,77

Perbedaan lokasi dan ukuran kapasitor hasil optimasi antara GA dan AGA pada sistem distribusi 118-bus, berakibat pada hasil akhir kedua metode. Dengan rugi-rugi daya total sebelum optimasi sebesar 887,0461 kW. Hasil reduksi rugi-rugi daya aktif yang diperoleh pada metode AGA lebih baik daripada metode GA dengan penurunan rugi-rugi yang dihasilkan AGA selisih 6,01 kW atau 0,93 % terhadap GA.

V. KESIMPULAN

Kondisi tegangan minimal pada sistem sebelum optimasi terdapat pada bus 118 sebesar 0,9321 pu. Setelah optimasi tegangan minimal terdapat pada bus 71 sebesar 0,9418 pu. Sedangkan untuk tegangan pada bus-bus lainnya tetap terjaga besarnya, sehingga tidak ada yang over voltage maupun under voltage.

Kondisi faktor daya pada sisi pembangkitan sebelum optimasi sebesar 0,7995. Setelah optimasi faktor daya menjadi sebesar 0,9523.

Rugi-rugi daya aktif total sebelum optimasi sebesar 887,0461 kW. Setelah optimasi rugi-rugi daya aktif menjadi 643,7702 kW. Terjadi penurunan sebesar 243,2759 kW (27,43 %).

Hasil perbandingan dengan metode GA untuk menyelesaikan optimasi penentuan lokasi dan ukuran kapasitor pada sistem distribusi 118-bus, menunjukkan bahwa AGA mampu mereduksi rugi-rugi daya aktif lebih besar daripada GA.

Untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan reduksi rugi-rugi daya pada sistem distribusi akan mempertimbangkan kombinasi optimasi antara optimasi kompensasi kapasitif dan rekonfigurasi jaringan. Sedangkan untuk metode optimasi dapat menggunakan optimasi dengan pendekatan matematika yang telah berhasil diimplementasikan pada optimasi dengan objektif tunggal, yaitu: dynamic economic dispatch [23] dan optimasi dengan multi objektif, yaitu: dynamic economic emission dispatch [24].

REFERENSI

- [1] S. Nojavan, M. Jalali, K. Zare, *Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach*, Int. J. Electric Power Syst. Res. **107**: 119–124(2014).
- [2] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, M. Karimi, *Optimum shunt capacitor placement in distribution system—a review and comparative study*, Renew. Sustain. Energy Rev. **30**:429–439(2014).
- [3] H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings, H. D. Shin, *Optimal capacitor placements in distribution systems: Part I: a new formulation and the overall problem*, IEEE Trans. Power Delivery **5**,2:634–642(1990).
- [4] D. Zhang, Zhengcai Fu, L. Zhang, *Joint optimization for power loss reduction in distribution systems*, IEEE Trans. Power Syst. **23**,1: 161-169(2008).
- [5] R. A. Gallego, A. J. Monticelli, R. Romero, *Optimal capacitor placement in radial distribution networks using tabu search*, IEEE Trans. Power Syst. **16**,2:630–637(2001).
- [6] Y. M. Shuaib, M. S. Kalavathi, C.C.A. Rajan, *Optimal capacitor placement in radial distribution system using gravitational search algorithm*, Int. J. Electr. Power Energy Syst. **64**: 384–397(2015).
- [7] M. Sedighzadeh, D. Arzaghi-haris, *Optimal allocation and sizing of capacitors to minimize the distribution line loss and to improve the voltage profile using big bang-big crunch optimization*, Int. Rev. Electrical Eng. **6**,4:2013–2019(2011).
- [8] B. Venkatesh, R. Ranjan, *Optimal radial distribution system reconfiguration using fuzzy adaptation of evolutionary programming*, Int. J. Electr. Power Energy Syst. **25**,10: 775–780(2003).
- [9] M. Raju, K. Murthy, K. Avindra, *Direct search algorithm for capacitive compensation in radial distribution systems*, Int. J. Electrical Power Energy Syst. **42**,1: 24–30(2012).
- [10] E. S. Ali, S. A. Elazim, A. Y. Abdelaziz, *Improved harmony algorithm for optimal locations and sizing of capacitors in radial distribution systems*, Int. J. Electr. Power Energy Syst. **79**: 275–284(2016).
- [11] A. Hamouda, S. Sayah, *Optimal capacitors sizing in distribution feeders using heuristic search based node stability indices*, Int. J. Electrical Power Energy Syst. **46**: 56–64(2013).
- [12] S. Sultana, P. K. Roy, *Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization*, Int. J. Electrical Power Energy Syst. **54**: 387–398(2014).
- [13] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. Ramakingaraju, *Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm*, Int. J. Electrical Power Energy Syst. **33**:1133–1139(2011).
- [14] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, X. S. Yang, *Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm*, Alexandria Eng. J. **57**: 2775–2786(2018).
- [15] K. Prakash, M. Sydulu, *Particle swarm optimization based capacitor placement on distribution systems*, IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, 1–5(2007).
- [16] A. A. El-Fergany, A. Y. Abdelaziz, *Artificial bee colony algorithm to allocate fixed and switched static shunt capacitors in radial distribution networks*, Electric Power Comp. Syst. **42**,5: 427–438(2014).
- [17] C. T. Su, C. F. Chang, J. P. Chiou, *Optimal capacitor placement in distribution systems employing ant colony search algorithm*, Electric Power Comp. Syst. **33**,8: 931–946 (2005).
- [18] A. A. El-Fergany, A. Y. Abdelaziz, *Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm*, IET Gen., Transm., & Distrib. **8**,2: 223–232(2014).
- [19] K. R. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari, *Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm*, Int. J. Electr. Power Energy Syst. **71**:383–390(2015).
- [20] P. Das, S. Banerjee, *Optimal sizing and placement of capacitor in a radial distribution system using loss sensitivity factor and firefly algorithm*, Int. J. Eng. Comput. Sci. **3**,4: 5346–5352(2014).
- [21] M. Sydulu, V. Reddy, *Index and GA based optimal location and sizing of distribution system capacitors*, IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 1–4(2007).
- [22] A. R. Abul 'Wafa, *Optimal capacitor placement for enhancing voltage stability in distribution systems using analytical algorithm and Fuzzy-Real Coded GA*, Int. J. Electr. Power Energy Syst. **55**: 246–252(2014).
- [23] P. Julianto, A. Soeprijanto, Mardlijah, *Dynamic Economic Dispatch with Integration of Compressed Air Energy Storage Considering Large Penetration of Photovoltaic Generation Systems*, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), **14**,5:388-398(2021).
- [24] P. Julianto, A. Soeprijanto, Mardlijah, *Confronting the Duck curve Problem using Dynamic Economic Emission Dispatch with CAES*, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, **15**,4:520-532(2022).