Penggunaan Algoritma Genetika Untuk Penempatan Ukuran dan Kapasitas STATCOM Pada Sistem Interkoneksi Kelistrikan SULBAGSEL

Muhira Dzar Faraby[1], Zaenab Muslimin[2], dan Anugerah Yoga Finandi[3], Sofyan Sofyan[4]
[1,3] Program Studi D4 Teknik Listrik, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Indonesia
[2] Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
Correspondent Author : muhiradzarfaraby@poliupg.ac.id

***Abstract* — Reactive power regulation is required to maintain the voltage profile and reduce power losses in an interconnected power system. This study aims to determine the optimal location and capacity of a Static Synchronous Compensator (STATCOM) in the SULBAGSEL interconnected power system using a genetic algorithm. The system is modeled under steady-state conditions using data from 78 buses and 93 transmission lines. Each individual in the genetic algorithm represents a combination of bus location and STATCOM capacity, while the fitness value is determined from active power losses and system voltage deviation. Performance is evaluated by comparing the system conditions before and after installing the optimized STATCOM. The results show that the optimal STATCOM location is bus 60 with a capacity of 155 MVAr. The installation increases the minimum system voltage from 0.9372 p.u. to 0.9509 p.u., bringing all buses within the 0.95–1.05 p.u. operating range. Active power losses decrease from 38.678 MW to 36.359 MW (6.00%), while reactive power losses decrease from 72.725 MVAr to 61.039 MVAr (16.07%). These results demonstrate that the genetic algorithm is effective for determining STATCOM placement and capacity in the SULBAGSEL system.**

***Keyword* — Genetic Algorithm, Optimization, STATCOM, SULBAGSEL, Voltage Profile.**

Abstrak — Pengaturan daya reaktif diperlukan untuk menjaga profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem interkoneksi tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan menentukan lokasi dan kapasitas optimal Static Synchronous Compensator (STATCOM) pada sistem interkoneksi kelistrikan SULBAGSEL menggunakan algoritma genetika. Sistem dimodelkan dalam kondisi tunak menggunakan data 78 bus dan 93 saluran transmisi. Setiap individu dalam algoritma genetika merepresentasikan kombinasi lokasi bus dan kapasitas STATCOM, sedangkan nilai fitness ditentukan berdasarkan rugi-rugi daya aktif dan deviasi tegangan sistem. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan setelah pemasangan STATCOM hasil optimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi optimal STATCOM berada pada bus 60 dengan kapasitas 155 MVAr. Pemasangan tersebut meningkatkan tegangan minimum sistem dari 0,9372 p.u. menjadi 0,9509 p.u., sehingga seluruh bus berada dalam batas operasi 0,95–1,05 p.u. Selain itu, rugi-rugi daya aktif menurun dari 38,678 MW menjadi 36,359 MW atau sebesar 6,00%, sedangkan rugi-rugi daya reaktif menurun dari 72,725 MVAr menjadi 61,039 MVAr atau sebesar 16,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma genetika efektif untuk menentukan penempatan dan kapasitas STATCOM pada sistem SULBAGSEL.

***Kata kunci* —** Algoritma Genetika, Optimasi, Profil Tegangan, STATCOM, SULBAGSEL.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik interkoneksi harus mampu menyalurkan daya secara andal dengan tetap mempertahankan tegangan setiap bus dalam batas operasi yang ditetapkan. Perubahan pembebanan, konfigurasi jaringan, dan pola aliran daya dapat memengaruhi keseimbangan daya reaktif serta profil tegangan sistem. Ketidakcukupan daya reaktif dapat menyebabkan penurunan tegangan, meningkatkan arus saluran, dan memperbesar rugi-rugi daya. Stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem mempertahankan tegangan tunak yang dapat diterima setelah mengalami perubahan kondisi operasi atau gangguan [1].

Salah satu perangkat *Flexible AC Transmission System* yang dapat digunakan untuk mengatur daya reaktif adalah *Static Synchronous Compensator* atau STATCOM. Perangkat ini terhubung secara paralel dengan sistem dan mampu menginjeksikan atau menyerap daya reaktif melalui pengaturan tegangan keluaran *Voltage Source Converter* [2]. Ketika tegangan keluaran STATCOM lebih tinggi daripada tegangan bus, STATCOM bekerja dalam mode kapasitif dan menyuplai daya reaktif. Sebaliknya, ketika tegangan keluarannya lebih rendah, STATCOM bekerja dalam mode induktif dan menyerap daya reaktif [3].

Efektivitas STATCOM dipengaruhi oleh lokasi pemasangan dan kapasitas perangkat. Penempatan yang kurang tepat dapat memberikan perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya yang terbatas. Kapasitas yang terlalu kecil belum tentu mampu memenuhi kebutuhan kompensasi, sedangkan kapasitas yang terlalu besar dapat menyebabkan penggunaan perangkat menjadi tidak efisien. Penentuan lokasi dan kapasitas STATCOM merupakan permasalahan optimasi karena terdapat banyak kombinasi bus kandidat dan nilai kapasitas yang dapat dipilih.

Algoritma genetika dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut melalui proses pembentukan populasi, evaluasi nilai *fitness*, seleksi, *crossover*, mutasi, dan pembentukan generasi baru [4]–[6]. Dalam optimasi STATCOM, setiap individu merepresentasikan kombinasi lokasi bus dan kapasitas perangkat, sedangkan kualitasnya

dievaluasi berdasarkan hasil analisis aliran daya, profil tegangan, dan rugi-rugi daya sistem.

Penelitian ini bertujuan menentukan lokasi dan kapasitas optimal satu unit STATCOM pada sistem interkoneksi kelistrikan SULBAGSEL menggunakan algoritma genetika. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi awal sistem dan kondisi setelah pemasangan STATCOM hasil optimasi. Kinerja solusi dievaluasi berdasarkan perubahan profil tegangan setiap bus serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem.

II. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi aliran daya dan optimasi berbasis algoritma genetika untuk menentukan lokasi serta kapasitas STATCOM pada sistem interkoneksi kelistrikan SULBAGSEL. Proses penelitian terdiri atas pemodelan sistem, simulasi kondisi awal, formulasi fungsi objektif, optimasi lokasi dan kapasitas STATCOM, serta evaluasi kondisi sistem setelah pemasangan STATCOM. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB R2023a pada kondisi tunak dengan data sistem saat beban puncak.

A. State of the Art dan Metode yang Diusulkan

Penentuan lokasi dan kapasitas perangkat kompensasi daya reaktif telah dikembangkan menggunakan berbagai metode optimasi. Ristiardi [4] menggunakan algoritma genetika untuk menentukan lokasi dan kapasitas STATCOM pada sistem transmisi JAMALI, sedangkan Haz *et al.* [5] menerapkan *Inertia Weight Particle Swarm Optimization* untuk penempatan SVC pada sistem Sulselbar. Zulfahri dan Zondra [6] juga menggunakan algoritma genetika untuk optimasi penempatan SVC. Hatziargyriou *et al.* [7] menjelaskan bahwa pengaturan daya reaktif dan perangkat elektronika daya memiliki peran penting dalam mempertahankan stabilitas tegangan sistem tenaga.

Metode optimasi yang lebih baru meliputi algoritma genetika diskrit-kontinu untuk penempatan dan kapasitas D-STATCOM [8], model *genetic-convex* untuk kompensasi daya reaktif [9], optimasi STATCOM dengan mempertimbangkan biaya operasi [10], serta *Salp Swarm Algorithm* untuk penempatan D-STATCOM [11]. Kajian Mumtahina *et al.* [12] menunjukkan bahwa fungsi objektif optimasi STATCOM umumnya mencakup rugi-rugi daya, deviasi tegangan, dan biaya operasi. Pendekatan lain meliputi integrasi MATLAB–GAMS [13], metode hibrida algoritma genetika dan *improved particle swarm optimization* [14], serta algoritma dua tahap untuk meningkatkan keamanan statis sistem [15].

Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian ini mengoptimalkan lokasi dan kapasitas satu unit STATCOM secara simultan pada sistem interkoneksi SULBAGSEL. Setiap kandidat solusi direpresentasikan menggunakan kromosom berkode real dan dievaluasi melalui simulasi aliran daya berdasarkan rugi-rugi daya aktif dan deviasi tegangan seluruh bus. Solusi optimal kemudian dievaluasi dengan membandingkan profil tegangan serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif sebelum dan setelah pemasangan STATCOM.

B. Data dan Pemodelan Sistem SULBAGSEL

Data yang digunakan merupakan data sekunder sistem interkoneksi SULBAGSEL yang terdiri atas data bus, pembangkitan, beban, dan parameter saluran transmisi. Sistem dimodelkan menjadi 78 bus dan 93 saluran dengan daya dasar sebesar 100 MVA. Berdasarkan jenisnya, sistem terdiri atas satu bus referensi, 20 bus pembangkit atau bus PV, dan 57 bus beban atau bus PQ. Tingkat tegangan yang dimodelkan meliputi 30, 70, 150, dan 275 kV.

Bus referensi digunakan untuk menjaga keseimbangan daya aktif dan reaktif sistem. Pada bus PV, daya aktif dan magnitudo tegangan ditentukan, sedangkan daya reaktif dan sudut tegangan diperoleh dari hasil perhitungan aliran daya. Pada bus PQ, daya aktif dan reaktif ditentukan, sedangkan magnitudo dan sudut tegangan dihitung melalui proses iterasi.

Persamaan aliran daya aktif dan reaktif pada bus ke-i masing-masing dirumuskan sebagai:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j \left[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \tag{1}$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j \left[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \tag{2}$$

dengan P_i dan Q_i masing-masing merupakan injeksi daya aktif dan reaktif pada bus ke-i, V_i merupakan magnitudo tegangan, δ_i merupakan sudut tegangan, serta G_{ij} dan B_{ij} merupakan bagian riil dan imajiner elemen matriks admitansi bus.

Keseimbangan daya pada setiap bus dinyatakan sebagai:

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_i = 0 \tag{3}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{\mathrm{ST},i} - Q_i = 0 \tag{4}$$

dengan P_{Gi} dan Q_{Gi} merupakan daya pembangkitan, P_{Di} dan Q_{Di} merupakan daya beban, sedangkan $Q_{\mathrm{ST},i}$ merupakan daya reaktif yang diberikan oleh STATCOM pada bus ke-i.

C. Pemodelan STATCOM

STATCOM dimodelkan sebagai perangkat kompensasi shunt yang menginjeksikan daya reaktif pada bus terpilih. Dalam kondisi tunak, pertukaran daya aktif STATCOM dengan sistem diabaikan sehingga:

$$P\mathrm{ST} \approx 0 \tag{5}$$

Kontribusi daya reaktif STATCOM pada setiap bus dinyatakan sebagai:

$$Q_{\mathrm{ST},i} = u_i Q_{\mathrm{ST}} \tag{6}$$

dengan:

$$u_i = \begin{cases} 1, & i = b_{\mathrm{ST}} \\ 0, & i \neq b_{\mathrm{ST}} \end{cases} \tag{7}$$

di mana b_{ST} merupakan lokasi pemasangan STATCOM dan Q_{ST} merupakan kapasitas STATCOM. Nilai positif Q_{ST} menunjukkan injeksi daya reaktif ke sistem.

Variabel keputusan optimasi dituliskan sebagai:

$$\mathrm{x} = [b_{\mathrm{ST}} \quad Q_{\mathrm{ST}}] \tag{8}$$

Variabel b_{ST} berupa bilangan bulat yang menunjukkan nomor bus, sedangkan Q_{ST} berupa bilangan real yang menunjukkan kapasitas STATCOM dalam MVAr.

D. Formulasi Fungsi Objektif

Optimasi dilakukan untuk meminimalkan rugi-rugi daya aktif sekaligus memperkecil penyimpangan tegangan bus terhadap nilai referensi 1 p.u. Rugi-rugi daya aktif total pada seluruh saluran dirumuskan sebagai:

$$P_L = \sum_{k=1}^{N_{TL}} g_k \left[V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)\right] \tag{9}$$

dengan P_L merupakan total rugi-rugi daya aktif dalam satuan per unit, N_{TL} merupakan jumlah saluran transmisi, g_k merupakan konduktansi saluran ke-k, sedangkan i dan j merupakan bus pengirim dan penerima saluran. Deviasi tegangan total dihitung terhadap tegangan referensi 1 p.u. menggunakan:

$$VD = \sum_{i=1}^{N_B} \left|V_i - V_i^{\mathrm{ref}}\right| \tag{10}$$

dengan N_B merupakan jumlah bus dan:

$$V_i^{\mathrm{ref}} = 1.0 \text{ p. u.} \tag{11}$$

Fungsi objektif optimasi dirumuskan sebagai:

$$min\ F(x) = P_L + VD \tag{12}$$

Karena algoritma genetika yang digunakan melakukan pemaksimalan nilai *fitness*, fungsi objektif pada (12) dikonversi menjadi:

$$\mathrm{Fitness(x)} = \frac{1}{P_L + VD} \tag{13}$$

Semakin kecil nilai rugi-rugi daya dan deviasi tegangan, semakin besar nilai *fitness* suatu individu.

Batasan optimasi yang diterapkan meliputi:

$$1 \le b_{\mathrm{ST}} \le 78, \qquad b_{\mathrm{ST}} \in \mathbb{Z} \tag{14}$$

$$1 \le Q_{\mathrm{ST}} \le 300 \text{ MVAr} \tag{15}$$

$$0.95 \le V_i \le 1.05 \text{ p. u.}, \qquad i = 1,2, \dots, N_B \tag{16}$$

Selain batasan tersebut, setiap kandidat solusi harus menghasilkan perhitungan aliran daya yang konvergen. Kandidat yang tidak memenuhi batas tegangan atau tidak menghasilkan konvergensi diberi penalti sehingga memiliki peluang lebih kecil untuk dipilih pada generasi berikutnya.

E. Algoritma Genetika yang Diusulkan

Algoritma genetika menggunakan kromosom berkode real yang terdiri atas dua gen, yaitu gen lokasi dan gen kapasitas STATCOM. Bentuk kromosom individu ke-m dirumuskan sebagai:

$$\mathrm{x}_m = [b_{\mathrm{ST},m} \quad Q_{\mathrm{ST},m}] \tag{17}$$

Nilai awal setiap gen dibangkitkan secara acak dalam interval $[0, 1]$, kemudian didekodekan ke ruang pencarian menggunakan:

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})g \tag{18}$$

dengan g merupakan bilangan acak pada interval $[0, 1]$. Berdasarkan (18), lokasi dan kapasitas STATCOM diperoleh melalui:

$$b_{\mathrm{ST}} = \mathrm{round}[1 + (78 - 1)g_1] \tag{19}$$

$$Q_{\mathrm{ST}} = 1 + (300 - 1)g_2 \tag{20}$$

Setiap individu dimasukkan ke dalam data sistem dengan menambahkan injeksi daya reaktif pada bus yang dikodekan oleh kromosom. Setelah itu, simulasi aliran daya dilakukan untuk memperoleh tegangan bus dan rugi-rugi daya yang digunakan dalam perhitungan *fitness*.

Seleksi induk dilakukan menggunakan metode *roulette wheel*. Probabilitas pemilihan individu ke-m dirumuskan sebagai:

$$p_m = \frac{f_m}{\sum_{n=1}^{N_P} f_n} \tag{21}$$

dengan f_m merupakan nilai *fitness* individu ke-m dan N_P merupakan ukuran populasi. Individu dengan nilai *fitness* lebih tinggi memiliki probabilitas lebih besar untuk menjadi induk.

Proses *crossover* dilakukan melalui kombinasi linear dua kromosom induk. Dua kromosom anak dibentuk menggunakan:

$$\mathrm{x'}_1 = r\mathrm{x}_1 + (1 - r)\mathrm{x}_2 \tag{22}$$

$$\mathrm{x'}_2 = r\mathrm{x}_2 + (1 - r)\mathrm{x}_1 \tag{23}$$

dengan r merupakan bilangan acak pada interval $[0, 1]$. Gen lokasi hasil *crossover* dibulatkan menjadi bilangan bulat, sedangkan gen kapasitas dipertahankan sebagai bilangan real.

Mutasi dilakukan pada gen terpilih dengan probabilitas p_m. Nilai gen hasil mutasi tetap dibatasi sesuai ruang pencarian pada (14) dan (15). Elitisme diterapkan dengan mempertahankan individu terbaik dari setiap generasi, sehingga solusi terbaik tidak hilang akibat proses *crossover* atau mutasi. Proses evolusi dihentikan ketika jumlah generasi maksimum tercapai.

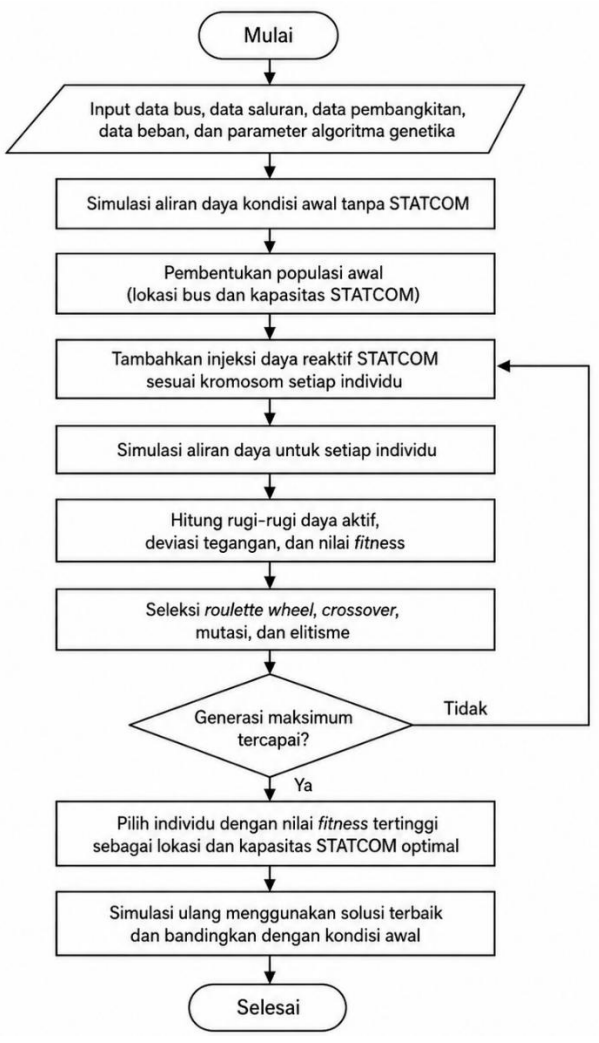
Parameter algoritma genetika ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I
PARAMETER ALGORITMA GENETIKA

Parameter	Nilai
Ukuran populasi	20 individu
Jumlah generasi maksimum	30
Probabilitas crossover	0,8
Probabilitas mutasi	0,1
Jumlah STATCOM	1 unit
Rentang lokasi	Bus 1–78
Rentang kapasitas	1–300 MVAr
Tegangan referensi	1,0 p.u.
Batas tegangan	0,95–1,05 p.u.

F. Tahapan Optimasi

Tahapan optimasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Optimasi Penempatan dan Kapasitas STATCOM Menggunakan Algoritma Genetika

G. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan pada dua kondisi. Kondisi pertama merupakan kondisi awal sistem tanpa pemasangan STATCOM. Simulasi aliran daya pada kondisi ini digunakan untuk memperoleh profil tegangan serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif sebagai nilai dasar. Kondisi kedua merupakan kondisi setelah satu unit STATCOM dipasang pada lokasi dan kapasitas optimal yang diperoleh menggunakan algoritma genetika. Simulasi aliran daya kemudian dilakukan kembali untuk mengetahui perubahan kinerja sistem.

Efektivitas hasil optimasi dievaluasi berdasarkan perubahan tegangan minimum, jumlah bus di luar batas 0,95–1,05 p.u., serta persentase penurunan rugi-rugi daya aktif dan reaktif yang dihitung menggunakan (24) dan (25).

$$\Delta P_L = \frac{P_{L,0} - P_{L,\mathrm{ST}}}{P_{L,0}} \times 100\% \tag{24}$$

$$\Delta Q_L = \frac{Q_{L,0} - Q_{L,\mathrm{ST}}}{Q_{L,0}} \times 100\% \tag{25}$$

dengan indeks 0 menunjukkan kondisi sebelum pemasangan dan indeks ST menunjukkan kondisi setelah pemasangan STATCOM.

III. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi awal sistem sebelum pemasangan STATCOM dan kondisi sistem setelah pemasangan STATCOM berdasarkan hasil optimasi algoritma genetika. Evaluasi dilakukan terhadap lokasi dan kapasitas STATCOM yang diperoleh, profil tegangan setiap bus, serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem.

A. Hasil Optimasi Lokasi dan Kapasitas STATCOM

Proses optimasi dilakukan dengan membangkitkan sejumlah kandidat solusi yang merepresentasikan kombinasi lokasi bus dan kapasitas STATCOM. Setiap kandidat dievaluasi melalui analisis aliran daya berdasarkan nilai rugi-rugi daya aktif dan deviasi tegangan sistem.

Berdasarkan proses optimasi menggunakan algoritma genetika, diperoleh lokasi dan kapasitas optimal STATCOM sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II.

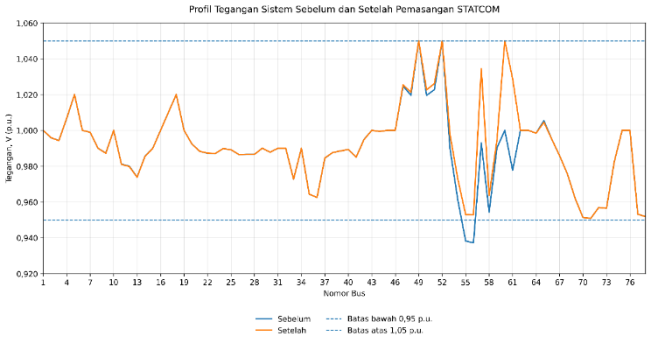
TABEL II
HASIL OPTIMASI LOKASI DAN KAPASITAS STATCOM

Parameter	Hasil optimasi
Jumlah STATCOM	1 unit
Lokasi pemasangan	Bus 60
Kapasitas	155 MVAr
Tegangan nominal bus	70 kV

Hasil optimasi menunjukkan bahwa lokasi optimal tidak selalu sama dengan bus yang memiliki tegangan awal terendah. Algoritma genetika mengevaluasi pengaruh pemasangan STATCOM terhadap keseluruhan sistem, sehingga bus 60 dengan kapasitas 155 MVAr dipilih karena memberikan kombinasi terbaik antara perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya.

B. Analisis Profil Tegangan

Perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan STATCOM ditunjukkan pada Gambar 2. Sebelum pemasangan STATCOM, terdapat dua bus dengan tegangan di bawah batas minimum 0,95 p.u., yaitu bus 55 sebesar 0,9382 p.u. dan bus 56 sebesar 0,9372 p.u. Tegangan pada bus 56 merupakan nilai minimum pada kondisi awal sistem.



Gambar 2. Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan STATCOM pada Kondisi Awal Sistem

Setelah STATCOM berkapasitas 155 MVAr dipasang pada bus 60, tegangan bus 55 meningkat menjadi 0,9529 p.u. dan tegangan bus 56 meningkat menjadi 0,9528 p.u. Tegangan minimum sistem setelah pemasangan menjadi 0,9509 p.u. pada bus 71, sehingga seluruh bus telah berada dalam batas operasi 0,95–1,05 p.u.

Peningkatan tegangan terbesar terjadi pada bus 61 sebesar 0,0511 p.u., bus 60 sebesar 0,0500 p.u., dan bus 57 sebesar 0,0415 p.u. Hal tersebut menunjukkan bahwa injeksi daya reaktif STATCOM memberikan pengaruh terbesar pada bus pemasangan dan bus-bus yang memiliki kedekatan elektris dengannya. Tegangan maksimum setelah pemasangan tetap sebesar 1,0500 p.u. pada bus 49, bus 52, dan bus 60. Dengan demikian, pemasangan STATCOM mampu menghilangkan kondisi *undervoltage* tanpa menyebabkan *overvoltage*.

C. Analisis Rugi-Rugi Daya

Pemasangan STATCOM pada bus 60 dengan kapasitas 155 MVAr tidak hanya memperbaiki profil tegangan, tetapi juga mengurangi rugi-rugi daya sistem. Rugi-rugi daya aktif menurun dari 38,678 MW menjadi 36,359 MW atau berkurang sebesar 2,319 MW. Berdasarkan (24), persentase penurunan rugi-rugi daya aktif adalah sebesar 6,00%.

Rugi-rugi daya reaktif menurun dari 72,725 MVAr menjadi 61,039 MVAr atau berkurang sebesar 11,686 MVAr. Berdasarkan (25), persentase penurunan rugi-rugi daya reaktif adalah sebesar 16,07%.

Penurunan rugi-rugi daya reaktif lebih besar daripada penurunan rugi-rugi daya aktif karena STATCOM secara langsung mengatur aliran daya reaktif. Injeksi daya reaktif pada bus 60 mengurangi kebutuhan penyaluran daya reaktif melalui saluran transmisi. Berkurangnya aliran daya reaktif menyebabkan arus saluran menurun sehingga rugi-rugi daya aktif juga ikut berkurang.

D. Evaluasi Hasil Optimasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma genetika berhasil menentukan lokasi dan kapasitas STATCOM yang dapat memperbaiki kondisi sistem secara keseluruhan. Pemasangan STATCOM pada bus 60 dengan kapasitas 155 MVAr meningkatkan tegangan minimum dari 0,9372 menjadi 0,9509 p.u. serta menghilangkan kondisi *undervoltage* pada bus 55 dan bus 56.

Tegangan bus 60 setelah pemasangan mencapai 1,0500 p.u., yaitu tepat pada batas maksimum yang digunakan. Hasil ini menunjukkan bahwa kapasitas 155 MVAr memenuhi batas tegangan yang ditetapkan dan mampu memperbaiki kondisi undervoltage pada sistem. Pengaruh penggunaan kapasitas di luar solusi optimal tidak dianalisis lebih lanjut dalam penelitian ini.

Algoritma genetika juga tidak memilih bus 56 sebagai lokasi pemasangan meskipun bus tersebut mempunyai tegangan awal paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan lokasi STATCOM tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan bus dengan tegangan minimum. Lokasi harus dievaluasi berdasarkan pengaruhnya terhadap aliran daya, profil tegangan seluruh bus, dan rugi-rugi daya sistem. Bus 60 memberikan pengaruh yang lebih luas terhadap area bus 53–61 serta menghasilkan penurunan rugi-rugi daya aktif dan reaktif.

Secara keseluruhan, hasil optimasi menghilangkan kondisi undervoltage, meningkatkan tegangan minimum sebesar 0,0137 p.u., serta menurunkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 6,00% dan 16,07%.

IV. Kesimpulan

Penggunaan algoritma genetika berhasil menentukan lokasi dan kapasitas STATCOM yang optimal pada sistem interkoneksi SULBAGSEL. Hasil optimasi menunjukkan bahwa satu unit STATCOM dengan kapasitas 155 MVAr optimal ditempatkan pada bus 60. Pemasangan tersebut meningkatkan tegangan minimum dari 0,9372 p.u. menjadi 0,9509 p.u., sehingga kondisi *undervoltage* pada bus 55 dan bus 56 dapat dihilangkan. Rugi-rugi daya aktif menurun dari 38,678 MW menjadi 36,359 MW atau sebesar 6,00%, sedangkan rugi-rugi daya reaktif menurun dari 72,725 MVAr menjadi 61,039 MVAr atau sebesar 16,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma genetika efektif untuk menentukan lokasi dan kapasitas STATCOM secara simultan serta meningkatkan kinerja sistem interkoneksi SULBAGSEL.

Daftar Acuan

[1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, *et al.*, “Definition and classification of power system stability: IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.

[2] M. Zainuddin and F. E. P. Surusa, “Analisis implementasi *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada saluran transmisi 150 kV,” *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 12, no. 2, pp. 218–224, 2015, doi: 10.24014/sitekin.v12i2.1016.

[3] R. Hazbullah, A. Andang, and Sutisna, "Simulasi dan analisis penempatan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) sebagai pengatur stabilitas tegangan pada saluran transmisi 150 kV," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 4, no. 1, 2022.

[4] T. P. B. Ristiardi, "Penentuan lokasi dan kapasitas optimal STATCOM untuk meminimasi rugi daya menggunakan *genetic algorithm* pada sistem transmisi JAMALI tahun 2018," Skripsi, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2017.

[5] F. Haz, G. A. Setia, Yusran, S. M. Said, and H. R. Iskandar, "The optimization of SVC placement in Sulselbar transmission system using inertia weight particle swarm optimization," in *Proc. 2nd Int. Conf. High Voltage Eng. Power Syst. (ICHVEPS)*, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011127.

[6] Zulfahri and E. Zondra, "Optimasi penempatan optimal peralatan SVC dengan metode algoritma genetika," *J. Tek.*, vol. 14, no. 1, pp. 114–120, 2020, doi: 10.31849/teknik.v14i1.3915.

[7] N. Hatziargyriou, J. Milanović, C. Rahmann, *et al*., "Definition and classification of power system stability—Revisited and extended," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.

[8] C. M. Castiblanco-Pérez, D. E. Toro-Rodríguez, O. D. Montoya, and D. A. Giral-Ramírez, "Optimal placement and sizing of D-STATCOM in radial and meshed distribution networks using a discrete-continuous version of the genetic algorithm," *Electronics*, vol. 10, no. 12, Art. no. 1452, 2021, doi: 10.3390/electronics10121452.

[9] N. Naningsi, I. Kitta, Z. Muslimin and M. D. Faraby, "Allocation of Reactive Power with Capacitor Bank Placement Considering the Use of Nonlinear Loads Using Particle Swarm Optimization," *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, Surabaya, Indonesia, 2023, pp. 472-478, doi: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427935.

[10] O. D. Montoya, J. E. Fuentes, F. D. Moya, J. Á. Barrios, and H. R. Chamorro, "Reduction of annual operational costs in power systems through the optimal siting and sizing of STATCOMs," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 10, Art. no. 4634, 2021, doi: 10.3390/app11104634.

[11] J. A. Mora-Burbano, C. D. Fonseca-Díaz, and O. D. Montoya, "Application of the SSA for optimal reactive power compensation in radial and meshed distribution using D-STATCOMs," *Algorithms*, vol. 15, no. 10, Art. no. 345, 2022, doi: 10.3390/a15100345.

[12] U. Mumtahina, S. Alahakoon, and P. Wolfs, "A literature review on the optimal placement of static synchronous compensator (STATCOM) in distribution networks," *Energies*, vol. 16, no. 17, Art. no. 6122, 2023, doi: 10.3390/en16176122.

[13] G. F. Barreto-Parra, B. Cortés-Caicedo, and O. D. Montoya, "Optimal integration of D-STATCOMs in radial and meshed distribution networks using a MATLAB–GAMS interface," *Algorithms*, vol. 16, no. 3, Art. no. 138, 2023, doi: 10.3390/a16030138.

[14] U. M. Ngei, A. M. Nyete, P. M. Moses, and C. Wekesa, "Optimal sizing and placement of STATCOM, TCSC and UPFC using a novel hybrid genetic algorithm-improved particle swarm optimization," *Heliyon*, vol. 10, no. 23, Art. no. e40682, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40682.

[15] V. S. Rao and R. S. Rao, "Optimal placement of STATCOM using two stage algorithm for enhancing power system static security," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 575–582, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.151.