

Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan artikel 10.22146/v14i3.19191

Perbandingan Algoritma *Sine Cosine* dan Kelelawar untuk Penempatan Pembangkit Listrik Terdistribusi

Lindiasari Martha Yustika^{1,2}, Jangkung Raharjo^{1,2}, Rifki Rahman Nur Ikhsan^{1,2}, I.G.P.O Indra Wijaya^{1,2}

¹ Program Studi Teknik Sistem Energi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University, Bandung, Jawa Barat 40257, Indonesia

² Center of Excellence for Sustainable Energy and Climate Change, Research Institute for Intelligent Business and Sustainable Economy, Bandung, Jawa Barat 40257, Indonesia

[Diserahkan: 13 Februari 2025, Direvisi: 2 Mei 2025, Diterima: 12 Agustus 2025]

Penulis Korespondensi: Jangkung Raharjo (email: jangkungraharjo@telkomuniversity.ac.id)

INTISARI — Peningkatan keandalan distribusi listrik merupakan faktor penting dalam upaya mendukung pembangunan berkelanjutan dan mengurangi ketimpangan akses energi. Integrasi pembangkit listrik terdistribusi (*distributed generation*, DG) berperan penting dalam memastikan keandalan dan stabilitas sistem tenaga. Sejumlah penelitian telah mengeksplorasi penempatan DG yang optimal menggunakan metode metaheuristik. Penelitian ini mengevaluasi kinerja kedua algoritma berdasarkan indikator utama, antara lain peningkatan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya pada kondisi beban normal dan pada peningkatan beban 10% untuk menyimulasikan pertumbuhan permintaan di masa mendatang. Metode yang digunakan adalah algoritma sinus-kosinus (*sine-cosine algorithm*, SCA) dan algoritma kelelawar (*bat algorithm*, BA). Penelitian ini bertujuan membandingkan kedua metode tersebut guna mengoptimalkan penempatan dan ukuran unit DG menggunakan konfigurasi sistem IEEE 9 bus sebagai studi kasus. Analisis aliran daya dilakukan menggunakan perangkat lunak Electric Transient Analysis Program (ETAP) untuk memvalidasi efektivitas penempatan DG yang optimal pada beragam skenario. Indikator kinerja utama, yaitu pengurangan rugi-rugi daya dan peningkatan profil tegangan, dievaluasi guna menentukan kekuatan relatif masing-masing algoritma. Hasil menunjukkan bahwa SCA dan BA efektif dalam mengoptimalkan implementasi DG. Secara spesifik, SCA berhasil mengurangi rugi-rugi daya aktif hingga 85% dan rugi-rugi daya reaktif hingga 93%, mengungguli BA pada skenario-skenario tertentu. Kedua algoritma ini meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem. Temuan ini menggarisbawahi potensi algoritma metaheuristik untuk mengatasi tantangan sistem tenaga modern dan berkontribusi pada tujuan yang lebih luas, yaitu mengembangkan sistem tenaga berkelanjutan.

KATA KUNCI — *Sine-Cosine Algorithm*, *Bat Algorithm*, Pembangkit Listrik Terdistribusi, IEEE 9 Bus, Metode Metaheuristik.

I. PENDAHULUAN

Distribusi listrik diawali dengan proses pembangkitan listrik di pembangkit dengan memanfaatkan berbagai sumber, seperti batu bara, nuklir, gas alam, hidro, angin, atau surya, sehingga dihasilkan energi. Listrik dibangkitkan pada tegangan tinggi untuk meminimalkan rugi-rugi daya selama transmisi. Sepanjang proses ini, sistem manajemen dan kontrol jaringan memantau dan mengoptimalkan operasi untuk memastikan stabilitas, keandalan, dan efisiensi. Teknologi modern, seperti jaringan pintar dan pembangkit listrik terdistribusi (*distributed generation*, DG), dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan sistem tenaga masa kini yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi.

Meningkatnya permintaan listrik dan transisi global menuju sistem tenaga yang lebih bersih dan berkelanjutan menegaskan pentingnya DG dalam jaringan listrik modern. DG, yang merupakan unit pembangkit listrik skala kecil dan biasanya terletak dekat dengan pusat beban listrik (*load center*), menawarkan beberapa keuntungan, antara lain berkurangnya rugi-rugi transmisi, meningkatnya keandalan, dan terintegrasinya sumber energi terbarukan. Pada umumnya, tegangan pada sistem tegangan menengah dan rendah tidak seimbang. Jika sistem terus beroperasi pada kondisi ini, stabilitas sistem tenaga listrik akan terganggu dan kualitas energi listrik yang dipasok akan berkurang.

Oleh karena itu, penerapan opsi berkelanjutan seperti DG yang terintegrasi ke dalam infrastruktur kelistrikan menjadi makin krusial [1]. Keandalan, keamanan, kemajuan teknologi, pertimbangan regulasi, dan pengurangan emisi merupakan faktor yang melatarbelakangi meningkatnya penetrasi energi

terbarukan. Para peneliti berfokus pada penggabungan sumber energi terbarukan, seperti tenaga angin dan surya, ke dalam proses optimasi seiring berkembangnya teknologi DG [2].

Ukuran dan penempatan unit DG secara signifikan memengaruhi efisiensi, keandalan, dan stabilitas keseluruhan sistem tenaga [3]. Penempatan dan ukuran unit DG yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak negatif, seperti peningkatan rugi-rugi daya, ketidakstabilan tegangan, dan biaya operasional yang lebih tinggi [4]. Untuk mendukung interkoneksi di hampir semua titik pada jaringan listrik, IEEE mengklasifikasikan fasilitas DG sebagai fasilitas pembangkit listrik dengan kapasitas jauh lebih kecil dibandingkan pembangkit listrik terpusat, umumnya 10 MW atau kurang. Berdasarkan [1], pengembangan pengendali terdistribusi untuk jaringan mikro DC dapat secara dinamis meminimalkan keseluruhan biaya pembangkitan dan mencapai regulasi tegangan terbatas. Kinerja pengendali yang diusulkan telah diverifikasi melalui simulasi tingkat sakelar yang ekstensif dan strategi tambahan, seperti pelepasan beban, di masa mendatang [5].

Dalam jaringan distribusi tegangan rendah dan menengah, telah diusulkan teknik terbaik penempatan dan perluasan sistem pembangkit energi terbarukan terdistribusi dan penyimpanan energi baterai, sehingga meminimalkan biaya investasi dan operasional sekaligus memaksimalkan keuntungan operator sistem distribusi [6]. Metode dekomposisi baru yang diusulkan secara efektif menentukan sistem penyimpanan energi baterai (*battery energy storage system*, BESS) yang optimal, sehingga menghasilkan solusi yang mendekati solusi optimal global dan terbukti efektif pada sistem distribusi skala besar di kondisi nyata.

Terdapat beberapa kombinasi perencanaan DG dalam sistem distribusi tenaga listrik: dimensi, posisi, kuantitas, dan jenis; hanya ukuran; hanya lokasi; ukuran dan lokasi; serta ukuran, lokasi, dan jumlah [7]. Berdasarkan jenis daya yang disediakan, sistem DG dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori. Pada kategori pertama, sistem hanya menyuntikkan daya aktif (nyata). Kedua, sistem hanya menyuntikkan daya reaktif, sedangkan sistem ketiga dapat menyuntikkan daya reaktif dan aktif. Kategorisasi ini menyoroti fleksibilitas dan kompleksitas perencanaan DG, terutama karena integrasi energi terbarukan menjadi makin penting untuk pengembangan sistem tenaga listrik berkelanjutan [8].

II. PENELITIAN TERKAIT

Beberapa metode telah diusulkan, baik kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) maupun kalkulus, berdasarkan kecil dan besarnya sistem. Berbagai jenis teknik komputasi AI telah diterapkan untuk mengoptimalkan ukuran dan lokasi DG, seperti algoritma genetika (*genetic algorithm*, GA) [9]–[13], koloni lebah buatan (*artificial bee colony*, ABC) [14], [15], *particle swarm optimization* (PSO) [2], [16], [17], *neural network* [18], [19], dan metode optimasi gabungan [20], [21], [8], yang menggabungkan dua atau lebih metode AI guna memanfaatkan keunggulan dan mengatasi keterbatasan masing-masing.

Referensi [22] menyajikan tinjauan secara menyeluruh mengenai teknik optimasi metaheuristik, khususnya penerapan algoritma metaheuristik guna menangani integrasi optimal dan implementasi dinamisnya dalam solusi fungsi objektif. Meskipun berbagai algoritma optimasi telah diusulkan untuk mengatasi penempatan dan ukuran unit DG, studi perbandingan yang mengevaluasi pendekatan metaheuristik tingkat lanjut masih terbatas [22]. Algoritma sinus-kosinus (*sine-cosine algorithm*, SCA) dan algoritma kelelawar (*bat algorithm*, BA) merupakan algoritma metaheuristik efektif yang umum digunakan untuk memecahkan masalah optimasi kompleks, seperti penempatan DG. Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan membandingkan SCA dan BA secara sistematis dalam upaya optimasi DG.

Kebaruan penelitian terletak pada evaluasi kinerja algoritma tersebut, dengan fokus pada metrik-metrik utama, yang meliputi reduksi rugi daya, tegangan, stabilitas, dan efisiensi komputasi. Lebih lanjut, penentuan ukuran DG juga mempertimbangkan pertumbuhan beban proyek [23]. Untuk meningkatkan ketahanan analisis, dimasukkan juga peramalan pertumbuhan beban berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik RUPTL 2021–2030 [24] dan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral [25], yang memperkirakan peningkatan permintaan listrik tahunan di Indonesia sebesar 6,4%, memastikan bahwa solusi optimasi yang diusulkan tetap efektif dan adaptif dalam kondisi beban di masa mendatang, dilengkapi dengan analisis kualitas daya untuk menilai stabilitas tegangan dan faktor daya.

Selain itu, studi optimasi berfokus pada integrasi, seperti analisis aliran beban menggunakan perangkat lunak Electric Transient Analysis Program (ETAP), guna memvalidasi hasil komputasi sekaligus memastikan penerapannya di dunia nyata. Studi kasus disimulasikan menggunakan sistem IEEE 9 bus. Meskipun berukuran kecil, sistem ini merupakan basis uji yang sangat baik untuk mengeksplorasi tantangan optimasi dalam sistem tenaga listrik dalam kondisi nyata.

Optimalisasi penempatan DG pada penelitian ini memiliki implikasi sosial yang signifikan, terutama meningkatkan keandalan pasokan listrik, sehingga daerah yang terletak jauh

dari sistem pembangkit listrik jarang mengalami gangguan. Selain itu, pengoptimalan penempatan DG dapat memperkuat pemberdayaan komunitas lokal melalui industri rumah tangga yang inklusif, pertumbuhan ekonomi, peningkatan layanan publik, dan pendidikan. Namun, penetrasi daya aktual dari unit DG yang konstan dapat menimbulkan gangguan tegangan pada jaringan distribusi daya akibat daya balik yang parah. Kinerja serta keandalan jaringan distribusi dapat dipengaruhi oleh pasokan daya yang tidak menentu pada perangkat DG yang ditenagai oleh sumber energi terbarukan. Untuk mengatasi masalah ini sekaligus mengoptimalkan integrasi peralatan listrik, teknik optimasi telah dikembangkan [22].

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan SCA dan BA. Algoritma BA digunakan untuk mengoptimalkan penempatan dan ukuran unit DG dalam jaringan listrik. SCA maupun BA merupakan algoritma optimasi metaheuristik berbasis populasi yang secara iteratif meningkatkan solusi kandidat menuju optimum global. Selain itu, algoritma BA dan SCA bergantung pada proses stokastik yang menggunakan bilangan acak untuk memandu proses pencarian dan memastikan keragaman dalam solusi kandidat, dengan solusi terbaik yang ditemukan sejauh ini memengaruhi pergerakan populasi di masa depan [26]. Kedua algoritma ini merupakan dua algoritma metaheuristik populer yang telah banyak digunakan untuk berbagai masalah optimasi [27]. Penelitian ini memperkenalkan atau berfokus pada metrik kinerja baru, antara lain peningkatan profil tegangan, minimalisasi rugi-rugi daya, atau keandalan sistem; dan analisis keefektifan setiap algoritma untuk mencapai tujuan-tujuan tersebut.

SCA menghasilkan solusi kandidat melalui proses osilasi antara fungsi sinus dan kosinus, sehingga memungkinkan eksplorasi dan eksploitasi ruang pencarian [28]. Dengan memanfaatkan kemampuan SCA, penelitian ini berupaya meminimalkan rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan. Sejak tahun 2020, penerapan SCA dalam sistem tenaga listrik makin mendapat perhatian, khususnya terkait integrasi DG yang optimal pada jaringan distribusi. Kemampuannya dalam menangani masalah optimasi skala besar, seperti minimalisasi rugi-rugi daya dan peningkatan stabilitas tegangan, membuatnya banyak dipilih oleh para peneliti [22].

Sebaliknya, BA meniru perilaku *echolocation* kelelawar, yang parameternya, seperti frekuensi, kenyaringan, dan laju denyut (*pulse rate*), disesuaikan secara dinamis untuk menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi secara efektif [29]. Algoritma ini telah banyak diterapkan pada sistem tenaga, khususnya untuk mengoptimalkan penempatan dan ukuran DG dan unit listrik lainnya dalam jaringan distribusi. Kemampuannya untuk meminimalkan rugi-rugi daya, meningkatkan stabilitas tegangan, dan meningkatkan efisiensi operasional menjadikannya metode yang berharga untuk menghadapi tantangan integrasi energi terbarukan dan keandalan jaringan. Namun, tantangan seperti penyetyelan parameter dan kerentanan terhadap optima lokal memerlukan penyempurnaan lebih lanjut untuk meningkatkan skalabilitas dan efektivitasnya dalam aplikasi dunia nyata [30].

Makalah ini menyajikan analisis komparatif antara SCA dan BA untuk mengoptimalkan penempatan DG pada sistem IEEE 9 bus. Kontribusi utama makalah ini adalah menunjukkan efektivitas kedua algoritma dalam mengurangi rugi-rugi daya, sekaligus mengevaluasi kinerja algoritma tersebut dalam meminimalkan rugi-rugi daya dan memastikan stabilitas tegangan dengan tetap mematuhi batasan sistem. Melalui perbandingan kedua metode ini, penelitian ini berusaha untuk

memberikan pemahaman mengenai kelebihan dan keterbatasan relatif masing-masing algoritma, sehingga dapat menjadi panduan berharga bagi para peneliti dan praktisi dalam memilih alat optimasi yang tepat untuk aplikasi sistem tenaga.

Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga mengenai penempatan strategis unit DG, yang selaras dengan tujuan yang lebih luas untuk mencapai sistem ketenagalistrikan yang berkelanjutan dan tangguh. Pendekatan ganda ini, yang terdiri atas validasi teoretis dan praktis, diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan.

III. MODEL SISTEM

Sistem ini bertujuan untuk mengoptimalkan ukuran dan penempatan DG dalam sistem tenaga listrik, khususnya sistem IEEE 9 bus, untuk meminimalkan rugi-rugi daya sekaligus memastikan kekeang operasional sistem. Integrasi DG ke dalam sistem memberikan beberapa manfaat, termasuk pengurangan rugi-rugi transmisi dan peningkatan stabilitas tegangan. Namun, penempatan dan ukuran unit DG yang optimal merupakan sebuah tantangan karena sifat aliran daya yang nonlinier dan kompleks dalam jaringan listrik.

Pada studi ini, masalah optimasi dirumuskan dengan tujuan-tujuan berikut. Pertama, meminimalkan total rugi-rugi daya di seluruh sistem dengan menentukan lokasi dan kapasitas optimal untuk unit-unit DG. Kedua, memastikan kepatuhan sistem pada beberapa kekeang, termasuk batas tegangan di setiap bus, keseimbangan daya, dan batas operasional unit-unit DG. Permasalahan ini ditangani dengan menggunakan dua metode optimasi yang berbeda, yang dibandingkan efektivitasnya dalam meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga stabilitas sistem. peningkatan beban sebesar 10% dilakukan pada sistem untuk mengevaluasi ketahanan algoritma optimasi pada skenario pertumbuhan beban di masa mendatang. Asumsi ini dibuat berdasarkan proyeksi RUPTL 2021–2030, yang memperkirakan pertumbuhan beban tahunan di Indonesia sekitar 6,4%. Dengan mengadopsi peningkatan beban yang sedikit lebih tinggi, analisis ini dirancang untuk menguji secara lebih ketat ketahanan dan kemampuan adaptasi metode-metode optimasi yang diusulkan pada kondisi permintaan tinggi.

Dengan menyelesaikan permasalahan ini, konfigurasi optimal untuk penempatan DG ditentukan, sehingga dapat memberikan wawasan berharga tentang dampak integrasi DG terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Bagian selanjutnya menguraikan representasi matematis dari objektif dan integrasinya ke dalam kerangka optimasi.

A. FUNGSI OBJEKTIF

Mengurangi rugi-rugi daya sistem secara keseluruhan merupakan tujuan utama penerapan DG. Rugi-rugi daya dalam sistem tenaga listrik umumnya disebabkan oleh resistansi pada saluran transmisi dan aliran beban dalam sistem. Fungsi objektif ini dapat dinyatakan dalam (1).

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

dengan P_{loss} merupakan total rugi-rugi daya (dalam Mw), N merupakan jumlah bus pada sistem, G_{ij} merupakan konduktans antara bus i dan j , $V_i V_j$ merupakan besarnya tegangan pada bus i dan bus j , dan θ_i, θ_j merupakan sudut tegangan di bus i dan bus j .

B. ALIRAN DAYA

Salah satu tahapan krusial dalam penelitian sistem tenaga adalah analisis aliran daya, yang berfungsi untuk menghitung

besaran tegangan, sudut fase, aliran daya, dan rugi-rugi pada jaringan dalam keadaan tunak. Modul analisis aliran daya pada perangkat lunak digunakan untuk menyimulasikan aliran daya pada berbagai kondisi operasi, termasuk skenario sebelum dan sesudah optimasi. Kerangka kerja simulasi ini memungkinkan evaluasi komprehensif penempatan dan ukuran DG, sehingga memastikan validitas sekaligus kepraktisan hasil optimasi. Integrasi ETAP memberikan fidelitas tinggi terhadap kondisi dunia nyata, yang dapat meningkatkan relevansi hasil studi.

Analisis aliran daya dalam penelitian ini dilakukan menggunakan ETAP, yang menyediakan perangkat simulasi andal untuk memvalidasi hasil yang diperoleh dari proses optimasi. ETAP digunakan untuk menghitung level tegangan, daya aktif (W), daya reaktif (VAR), dan rugi-rugi pada setiap bus dalam jaringan, sehingga memberikan gambaran kinerja sistem. Melalui simulasi penempatan dan ukuran unit DG, aliran daya turut membantu dalam mengidentifikasi efisiensi sistem optimal. Selain itu, analisis aliran daya juga menilai kontribusi daya reaktif unit DG, sehingga dapat memastikan ketepatan manajemen daya reaktif untuk menjaga keandalan sistem dan kestabilan faktor daya. Lebih lanjut, analisis ini mengevaluasi pengaruh integrasi DG terhadap infrastruktur yang ada, seperti saluran dan transformator, guna mencegah kelebihan beban dan memastikan kompatibilitas.

Sistem aliran daya ini menggunakan metode Newton-Raphson adaptif. Metode ini digunakan dalam ETAP karena karakteristik konvergensi dan efisiensi komputasinya yang unggul [31]. Pada simulasi, jumlah iterasi maksimum ditetapkan sebesar 99. ETAP dirancang sedemikian rupa sehingga apabila solusi tidak mencapai konvergensi dalam jumlah iterasi yang ditentukan, proses akan berhenti secara otomatis dan perangkat lunak akan memberi tahu pengguna.

Metode Newton-Raphson adaptif dipilih karena secara dinamis menyesuaikan ukuran dan arah langkah berdasarkan nonlinieritas sistem, sehingga meningkatkan stabilitas proses penyelesaian, terutama untuk jaringan dengan penetrasi pembangkit terdistribusi yang tinggi. Metode ini memastikan konvergensi yang lebih cepat dibandingkan metode Newton-Raphson tradisional dan mengurangi risiko divergensi pada sistem dengan kondisi awal yang menantang atau variabel dengan skala buruk. Hasil analisis aliran daya, termasuk profil tegangan, aliran saluran, dan rugi-rugi daya, menjadi masukan penting untuk mengevaluasi kelayakan dan kinerja penempatan DG yang dioptimalkan.

C. RUGI-RUGI DAYA

Rugi-rugi daya dalam sistem transmisi mengacu pada hilangnya energi listrik selama proses transmisi dari sumber pembangkit ke pengguna akhir melalui saluran transmisi. Rugi-rugi daya ini terutama disebabkan oleh adanya resistans pada saluran transmisi. Akibat adanya resistans, aliran arus listrik pada saluran menyebabkan disipasi sebagian energi sebagai panas yang tidak dapat dimanfaatkan oleh beban. Selain itu, besarnya rugi-rugi daya dalam jaringan transmisi bergantung pada jenis dan panjang konduktor. Oleh karena itu, rugi-rugi daya perlu diprediksi dan diantisipasi agar terjadi dalam batas normal dan wajar. Rugi-rugi daya dalam sistem transmisi direpresentasikan dalam (2).

$$P_{loss} = I^2 \cdot R \quad (2)$$

dengan P_{loss} adalah rugi-rugi daya pada saluran transmisi (W), I adalah arus (A) yang mengalir pada konduktor, dan R adalah resistans (Ω).

Integrasi DG mampu mengurangi rugi-rugi daya secara signifikan dengan memasok daya lebih dekat ke pusat beban. Total kerugian daya, P_{loss} , dalam sistem dihitung berdasarkan konduktans saluran G_{ij} dan perbedaan tegangan, serta sudut fase antar bus. Ekspresi rugi-rugi daya dimasukkan secara langsung ke dalam fungsi objektif, sehingga proses optimasi difokuskan untuk meminimalkan kerugian daya [32].

D. BATASAN

Proses optimasi harus mematuhi beberapa batasan sistem untuk memastikan solusi yang layak dan praktis. Batasan ini mencakup batas tegangan dan besaran tegangan pada setiap bus harus tetap berada dalam batas yang dapat diterima, sebagaimana ditunjukkan pada (3).

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (3)$$

Keseimbangan daya, total pembangkitan, termasuk DG, harus sama dengan total permintaan beban ditambah rugi-rugi daya, sebagaimana yang ditunjukkan pada (4).

$$\sum P_{gen} = \sum P_{load} + P_{loss} \quad (4)$$

Batasan kapasitas DG, daya yang dihasilkan oleh unit DG harus berada dalam batas operasionalnya, seperti pada (5).

$$P_{DG,min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,max} \quad (5)$$

Dengan mengatasi batasan-batasan ini, optimasi memastikan bahwa penempatan DG dapat meningkatkan kinerja sistem tanpa melanggar persyaratan operasional atau teknis.

IV. METODOLOGI

Studi ini mengusulkan pendekatan sistematis untuk menganalisis dan mengoptimalkan penempatan dan kapasitas DG dalam konfigurasi sistem IEEE 9 bus. Metodologi ini melibatkan beberapa tahapan untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil.

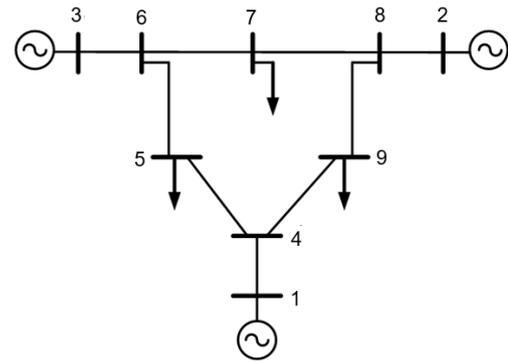
Pertama, parameter sistem, termasuk *single line diagram* (SLD), profil beban, impedansi saluran, spesifikasi transformator, dan data generator, dimodelkan menggunakan ETAP. Kedua, proses optimasi menggabungkan dua algoritma metaheuristik. Setiap algoritma diinisialisasi dengan parameter, termasuk ukuran populasi, batas iterasi, dan fungsi objektif, yang disesuaikan dengan permasalahan. Selanjutnya, hasil kedua metode dibandingkan berdasarkan indikator kinerjanya. Terakhir, analisis komprehensif dilakukan untuk menilai efektivitas SCA dan BA dalam berbagai skenario, termasuk berbagai kondisi beban dan kapasitas DG.

A. PENGUMPULAN DATA DAN PEMODELAN SISTEM

Pada studi ini, sistem IEEE 9 bus digunakan sebagai jaringan uji. Dataset standar IEEE digunakan untuk memperoleh parameter sistem, seperti data saluran, data bus, dan kebutuhan beban. Semua nilai impedansi disesuaikan dengan basis sistem, yang ditetapkan pada 100 MVA. Parameter jaringan, termasuk tegangan bus, impedansi saluran, rating transformator, dan kebutuhan beban, diambil dari dataset standar IEEE untuk memastikan akurasi dan reproducibility.

Gambar 1 menunjukkan representasi SLD sistem kelistrikan untuk sistem IEEE 9 bus. Sistem ini memiliki 9 bus, dengan tiga generator di bus 1, 2, dan 3. Spesifikasi masing-masing generator ditunjukkan pada Tabel I.

Tabel II menunjukkan parameter beban, sedangkan Tabel III menunjukkan data parameter transformator. Pada sistem IEEE 9 bus, terdapat tiga transformator yang berfungsi sebagai



Gambar 1. Single line diagram IEEE 9 bus.

TABEL I
DATA PEMBANGKIT

Informasi	Gen 1	Gen 2	Gen 3
S (MVA)	512	270	125
V (kV RMS L-L)	24	18	15,5
X_d (pu)	1,7	1,7	1,22
X'_d (pu)	0,27	0,256	0,174
X'' (pu)	0,2	0,185	0,134
T'_{do} (s)	3,8	4,8	8,97
T''_{do} (s)	0,01	0,01	0,033
X_q (pu)	1,65	1,62	1,16
X'_q (pu)	0,47	0,245	0,25
X''_q (pu)	0,2	0,185	0,134
T'_{qo} (s)	0,48	0,50	0,50
T''_{qo} (s)	0,0007	0,0007	0,0007
H (s)	2,6312	3,1296	4,768
D (pu)	2	2	2

TABEL II
PARAMETER DAYA

Item	Daya Bus_5	Daya Bus_6	Daya Bus_7
P	125 MW	90 MW	100 MW
Q	50 MVAR	30 MVAR	35 MVAR

TABEL III
PARAMETER TRAFU

Item	Trafo 1	Trafo 2	Trafo 3
$V_{primary}$ (kV)	24	18	15,5
$V_{secondary}$ (kV)	230	230	230
$R1$ (pu)	1×10^{-10}	1×10^{-10}	1×10^{-10}
$L1$ (pu)	$2,88 \times 10^{-20}$	$3,13 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-2}$
$R2$ (pu)	1×10^{-10}	1×10^{-10}	1×10^{-10}
$L2$ (pu)	$2,88 \times 10^{-20}$	$3,13 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-2}$
Rm	$5,00 \times 10^{+30}$	$5,00 \times 10^{+3}$	$5,00 \times 10^{+3}$
Lm	$5,00 \times 10^{+30}$	$5,00 \times 10^{+3}$	$5,00 \times 10^{+3}$

transformator penaik. Tabel IV menunjukkan data parameter saluran transmisi. Parameter saluran transmisi meliputi panjang, resistansi, dan induktansi pada konduktor ini.

B. TEKNIK OPTIMASI

Penelitian ini menerapkan dua algoritma optimasi, SCA dan BA, untuk membandingkan metode metaheuristik dan menyelesaikan permasalahan penempatan DG. Setiap algoritma yang diusulkan menggunakan perangkat lunak Python dan divalidasi menggunakan perangkat lunak ETAP guna menganalisis aliran beban.

Pada langkah-langkah SCA, populasi N kandidat yang diinisialisasi secara acak dalam ruang pencarian dirumuskan dalam (6).

TABEL IV
PARAMETER SALURAN

Bus	Jarak	R0	L0	R1 (Ω/	L1
Dari Ke	(km)	(Ω/km)	(Ω/km)	km)	(Ω/km)
4 5	89,980	0,5881	0,00398	0,00588	0,00133
4 6	97,336	0,924	0,00398	0,0924	0,00133
5 7	170,338	0,994	0,00398	0,0994	0,00133
6 9	179,860	1,15	0,00398	0,115	0,00133
7 8	76,176	0,590	0,00398	0,0590	0,00133
8 9	106,646	0,590	0,00398	0,0590	0,00133

$$X_i(0) = X_{min} + r (X_{max} - X_{min}) \quad (6)$$

dengan $X_i(0)$ merupakan posisi awal kandidat i , X_{min} dan X_{max} merupakan batas ruang pencarian, dan r merupakan bilangan acak $[0, 1]$.

Mekanisme pembaruan posisi dalam SCA diatur oleh fungsi sinus dan kosinus trigonometri. Posisi yang diperbarui dari setiap kandidat ditentukan berdasarkan nilai variabel acak: r_4 kurang dari atau lebih besar dari 0,5. Secara spesifik, posisi tersebut disesuaikan menggunakan (7).

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) + r_i \cdot \sin(r_2) \cdot |r_3 P - X_i(t)|, & \text{if } r_4 < 0,5 \\ X_i(t) + r_i \cdot \cos(r_2) \cdot |r_3 P - X_i(t)|, & \text{if } r_4 > 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

dengan t adalah iterasi saat ini, r_1, r_2, r_3 merupakan bilangan acak pada $[0,1]$, dan adalah P posisi pada populasi yang dipilih secara acak.

SCA menggunakan mekanisme kendali dinamis untuk *trade-off* eksplorasi-eksploitasi guna memfasilitasi konvergensi. Parameter r_1 , yang menentukan amplitudo pembaruan, menurun secara linier selama iterasi, dengan rumus ditunjukkan pada (8).

$$r_1 = r_1^{max} - \frac{t}{T} (r_1^{max} - r_1^{min}) \quad (8)$$

Parameter r_1 diizinkan untuk berkurang secara bertahap dari nilai maksimum ke minimum selama jumlah iterasi maksimum T . Pengurangan bertahap ini mengalihkan fokus algoritma dari eksplorasi luas pada tahap awal ke eksploitasi lokal pada iterasi selanjutnya. Lalu, *fitness* setiap solusi dievaluasi berdasarkan fungsi objektif, dengan solusi yang memiliki nilai *fitness* terbaik disimpan sebagai solusi optimal. SCA secara iteratif menyempurnakan posisi populasi, memanfaatkan kesederhanaan dan efektivitasnya dalam menyelesaikan masalah optimasi. SCA dan BA menawarkan mekanisme yang berbeda untuk mengatasi tantangan optimasi yang kompleks.

BA terinspirasi oleh perilaku *echolocation* pada kelelawar dan diawali dengan menginisialisasi populasi solusi kandidat, yang disebut *bat* atau kelelawar. Posisi $X_i(0)$ dan kecepatan $V_i(0)$ setiap kelelawar diinisialisasi secara acak dalam ruang pencarian, dengan posisi dihitung serupa dengan SCA menggunakan (5). Inisialisasi acak ini memastikan beragamnya solusi kandidat, yang sangat penting untuk eksplorasi yang efektif.

Algoritma BA memperkenalkan parameter frekuensi untuk memandu pencarian. Pada setiap iterasi, frekuensi f_i setiap kelelawar diperbarui menggunakan (9).

$$f_i = f_{min} + r (f_{max} - f_{min}) \quad (9)$$

dengan f_{min} dan f_{max} mendefinisikan rentang frekuensi. Lalu, Kecepatan setiap kelelawar diperbarui menggunakan (10).

$$V_i(t+1) = V_i(t) + (X_i(t) - X_*) f_i \quad (10)$$

dengan X_* adalah solusi global terbaik. Pembaruan posisi dihitung sebagaimana ditunjukkan pada (11).

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1). \quad (11)$$

Persamaan (10) memastikan bahwa kelelawar menyesuaikan posisi berdasarkan kecepatannya saat ini dan pengaruh solusi terbaik global. Untuk meningkatkan eksploitasi, BA menggabungkan mekanisme pencarian lokal. Pencarian acak di sekitar solusi terbaik X_* dilakukan menggunakan $X_* + \epsilon A_i$, dengan ϵ adalah bilangan dalam $[-1,1]$ dan A_i merepresentasikan tingkat kenyaringan kelelawar. Langkah pencarian lokal ini memastikan penyempurnaan di sekitar solusi yang menjanjikan, sehingga algoritma dapat menyempurnakan hasil secara efektif.

Selain itu, algoritma BA secara dinamis menyesuaikan dua parameter utama: kenyaringan A_i dan laju denyut r_i . Kenyaringan menurun seiring iterasi, sebagaimana pada (12).

$$A(t+1) = \alpha A_i(t) \quad (12)$$

sedangkan laju denyut meningkat, seperti pada (13).

$$r_i(t+1) = r_i(0)(1 - e^{-\gamma t}) \quad (13)$$

dengan α dan γ merupakan konstanta. Penyesuaian ini menyimulasikan perilaku kelelawar sesungguhnya, dengan mengurangi kenyaringan dan meningkatkan laju denyut yang mengindikasikan transisi dari eksplorasi ke eksploitasi.

Algoritma BA mengevaluasi kesesuaian setiap kandidat solusi menggunakan fungsi objektif. Solusi terbaik diperbarui secara iteratif dan algoritma berhenti ketika jumlah iterasi maksimum atau kriteria konvergensi terpenuhi. BA sangat efektif dalam mengatasi masalah optimasi yang kompleks dan multimodal karena mekanisme pencarian global dan lokalnya yang tangguh.

C. ANALISIS ALIRAN DAYA

Aliran daya merupakan instrumen penting dalam penelitian, perencanaan, dan evaluasi sistem tenaga. Hal ini memungkinkan para insinyur sistem tenaga untuk menilai keamanan konfigurasi dan operasi sistem tenaga dalam berbagai skenario pembebanan. Pemodelan dan simulasi diperlukan untuk memastikan aliran dan rugi-rugi daya dalam sistem tersebut [33]. Pendekatan perangkat lunak ETAP dengan metode Newton-Raphson adaptif digunakan untuk menganalisis aliran daya guna memvalidasi hasil optimasi. Metode ini memastikan perhitungan profil tegangan, aliran saluran, dan rugi-rugi daya yang akurat pada konfigurasi DG yang berbeda karena akurasi yang tinggi dan sifat konvergensi yang cepat, bahkan untuk sistem tenaga skala besar dan sangat nonlinier. Pada penelitian ini, analisis aliran daya dilakukan untuk memvalidasi penempatan dan ukuran unit DG yang ditentukan oleh SCA dan BA. Langkah validasi memastikan kelayakan dan kinerja solusi yang diusulkan oleh algoritma optimasi.

Analisis aliran daya merupakan langkah mendasar dalam penilaian kinerja sistem tenaga listrik di bawah pengaruh DG. Untuk memastikan sistem beroperasi dalam batas yang diizinkan, analisis ini menetapkan besaran tegangan dan sudut fase pada setiap bus serta aliran daya melalui saluran transmisi.

Penggunaan DG pada sistem IEEE 9 bus memodifikasi aliran daya dengan mengurangi rugi-rugi saluran, sehingga memperbaiki profil tegangan dan meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan. Untuk mengevaluasi efektivitas SCA dan BA, digunakan parameter DG yang telah dioptimalkan. Kemudian, hasil aliran daya yang sesuai

dianalisis. Indikator kinerja utama meliputi rugi-rugi daya aktif, indeks stabilitas tegangan, dan efisiensi sistem.

Dengan membandingkan hasil aliran daya untuk penempatan DG yang diperoleh dari dua teknik optimasi, penelitian ini menyoroti implikasi praktis dari SCA dan BA dalam mencapai kinerja sistem tenaga yang optimal.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis aliran daya dan prosedur optimasi diperoleh dalam tiga skenario: kondisi normal, integrasi DG menggunakan BA dan SCA dengan beban normal, dan penggunaan peningkatan beban 10% menggunakan SCA optimasi dan BA. Analisis komparatif mengevaluasi kinerja masing-masing metode dalam hal peningkatan profil tegangan sistem, pengurangan rugi-rugi daya, dan efisiensi sistem.

Hasil simulasi penempatan DG berdasarkan algoritma ditunjukkan pada Tabel V, yang menggambarkan profil tegangan sistem IEEE 9 bus. Untuk memastikan konsistensi analisis dan memudahkan perbandingan antareleman sistem, profil tegangan direpresentasikan dalam satuan per unit (pu).

A. HASIL SKENARIO 1

Sebelum integrasi DG, level tegangan pada bus-bus bawah berada pada kisaran 0,95 pu. Kondisi tersebut menandakan perlunya peningkatan stabilitas tegangan sistem dan memastikan kepatuhan terhadap standar operasional melalui penempatan DG. Deviasi tegangan ditemukan pada beberapa bus, terutama pada bus 4, 5, dan 6, dengan penurunan tegangan hingga 0,93 pu. Kondisi ini menunjukkan perlunya dukungan tegangan pada bus-bus ini. Dalam konteks integrasi DG dan analisis profil tegangan, menjaga level tegangan dalam batas-batas ini sangat penting. Penyimpangan tegangan secara signifikan dari rentang nominal, baik di bawah maupun di atas batas yang dapat diterima, dapat menimbulkan berbagai masalah operasional, keselamatan, dan kinerja dalam sistem kelistrikan. Kondisi *undervoltage* atau *overvoltage* berdampak negatif pada keandalan sistem, umur pakai peralatan, dan efisiensi operasional. Memastikan level tegangan tetap dalam standar, seperti SPLN 1:1995 (+5%, -10%), sangat penting untuk operasi sistem tenaga listrik yang aman dan efektif.

Penurunan tegangan yang terjadi pada bus 4, 5, dan 6 disebabkan oleh panjang saluran transmisi yang berlebihan. Saluran transmisi yang panjang atau kualitas konduktor yang buruk dapat meningkatkan resistansi, sehingga mengakibatkan penurunan tegangan yang signifikan. Permasalahan tersebut dapat memberikan dampak buruk, termasuk kerusakan peralatan listrik, penurunan efisiensi operasional, dan peningkatan rugi-rugi daya, jika tidak diatasi dan terus menerus terjadi. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, mengganggu pasokan daya konsumen, dan menurunkan keandalan sistem.

Berdasarkan algoritma SCA dan BA untuk lokasi DG, DG terletak pada bus yang sama, yaitu bus 6. Namun, dalam hal kapasitas, metode SCA dan BA memberikan hasil yang berbeda. Metode SCA menetapkan kapasitas DG sebesar 250 kW, sedangkan metode BA menetapkan kapasitas DG 299 kW.

B. HASIL SKENARIO 2

Skenario kedua melibatkan integrasi DG dengan beban normal (Tabel II). Algoritma SCA menunjukkan peningkatan signifikan pada profil tegangan di seluruh sistem IEEE 9 bus. Salah satu keunggulan utama metode SCA adalah kemampuannya mengatasi masalah *undervoltage* pada bus-bus kritis. Misalnya, bus 4 dan bus 5, yang semula memiliki level tegangan terendah 0,95 pu, dapat meningkat menjadi masing-

TABEL V
PROFIL TEGANGAN

ID Bus	Sebelum DG (pu)	Beban Normal dengan DG		Peningkatan Beban 10% dengan DG	
		SCA	BA	SCA	BA
Bus 1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Bus 2	1,04	1,00	1,10	1,06	1,04
Bus 3	1,02	1,02	1,07	1,04	1,01
Bus 4	0,93	0,99	1,01	1,01	0,93
Bus 5	0,95	0,98	1,01	1,01	0,94
Bus 6	0,95	1,00	1,00	1,00	0,94
Bus 7	1,01	1,00	1,07	1,04	1,01
Bus 8	1,01	1,01	1,07	1,04	1,00
Bus 9	1,00	1,01	1,06	1,03	1,00

masing 0,99 pu dan 0,98 pu. Nilai-nilai tersebut mendekati level tegangan nominal 1,00 pu, yang menandakan adanya peningkatan substansial pada stabilitas tegangan sistem. Peningkatan ini tidak hanya mengurangi risiko masalah terkait *undervoltage*, seperti inefisiensi motor, panas berlebih, atau kerusakan peralatan, tetapi juga mendukung keandalan operasi.

Lebih lanjut, SCA menunjukkan stabilitasnya dengan menjaga tegangan pada beberapa bus tetap berada pada nilai nominalnya. Bus 1 dan bus 7, misalnya, tetap pada 1,00 pu, yang menandakan bahwa proses optimasi tidak mengganggu *node* yang sudah berkinerja baik. Kemampuan algoritma untuk menyempurnakan penempatan dan kapasitas DG memastikan bahwa sistem secara keseluruhan beroperasi pada batas tegangan yang dapat diterima tanpa menyebabkan *overvoltage* atau *undervoltage* pada bus mana pun.

BA menunjukkan kinerja unggul pada optimasi profil tegangan di seluruh sistem IEEE 9 bus, bahkan melampaui hasil yang dicapai oleh algoritma SCA. Salah satu keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk meningkatkan level tegangan di semua bus, mendekati atau sedikit melampaui nilai nominal 1,00 pu. Optimasi ini tidak hanya menstabilkan sistem, tetapi juga meningkatkan ketahanannya, terutama pada area dengan kinerja tegangan yang awalnya buruk. Sebagai contoh, tegangan terendah bus 4 dan bus 5, yang semula sebesar 0,9 pu, meningkat secara signifikan menjadi masing-masing 1,01 pu. Kondisi ini menunjukkan bahwa bus-bus tersebut sepenuhnya terbebas dari kondisi *undervoltage* dan mencapai rentang operasional yang lebih kuat. Akan tetapi, algoritma BA memiliki kelemahan, yaitu munculnya kondisi *overvoltage* di beberapa bus, termasuk bus 2 (1,10 pu), bus 3 (1,07 pu), bus 7 (1,07 pu), bus 8 (1,07 pu), dan bus 9 (1,06 pu). Algoritma ini lebih cocok untuk skenario yang memerlukan perbaikan substansial di area jaringan tertentu.

Analisis perbandingan kedua algoritma menunjukkan bahwa SCA dan BA secara efektif meningkatkan profil tegangan, meskipun keduanya memiliki karakteristik kinerja yang berbeda. Untuk mengatasi permasalahan ini, proses optimasi perlu disempurnakan dengan memasukkan batasan tegangan yang lebih ketat guna memastikan tidak ada bus yang melebihi rentang tegangan yang diizinkan. Selain itu, integrasi perangkat kontrol tegangan seperti *on-load tap changer* atau kompensator daya reaktif dapat membantu mengatur level tegangan secara efektif.

C. HASIL SKENARIO 3

Pada skenario ketiga, beban tambahan sebesar 10% diterapkan di seluruh sistem untuk merepresentasikan proyeksi pertumbuhan beban di masa mendatang. Penyesuaian ini dilakukan untuk menilai secara ketat kemampuan algoritma

SCA dan BA dalam menjaga stabilitas tegangan dan kinerja sistem pada kondisi operasi yang tinggi.

Pada profil tegangan, SCA menunjukkan ketahanan yang kuat (Tabel V). Sebagian besar bus mampu mempertahankan tegangannya mendekati nilai nominal, dengan bus-bus kritis, seperti bus 4 dan bus 5, meningkat menjadi 1,01 pu, dan bus 6 tetap stabil pada 1,00 pu. Hasil ini menegaskan bahwa optimasi SCA secara efektif mampu mengakomodasi permintaan yang lebih tinggi tanpa mengorbankan stabilitas tegangan, sehingga meningkatkan keandalan sistem bahkan dalam kondisi dinamis. Kemampuan SCA untuk mempertahankan tingkat tegangan yang dapat diterima di seluruh jaringan menegaskan ketahanannya terhadap variabilitas beban dan kesesuaiannya untuk skenario pertumbuhan beban di masa mendatang.

Sebaliknya, algoritma BA menunjukkan penurunan kinerja regulasi tegangan di bawah beban yang meningkat. Beberapa bus, terutama bus 4 dan bus 5, mengalami penurunan tegangan masing-masing hingga 0,93 pu dan 0,94 pu, yang mengindikasikan kondisi *undervoltage*. Meskipun beberapa bus, seperti bus 1 dan bus 7, mampu mempertahankan kestabilan tegangan, kinerja keseluruhan algoritma BA di bawah kondisi beban yang lebih tinggi cenderung kurang stabil dibandingkan dengan SCA. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun BA efektif pada kondisi beban normal, kemampuan adaptasinya terhadap peningkatan tekanan sistem terbatas, sehingga menjadikan SCA pilihan yang lebih andal untuk memastikan stabilitas tegangan dalam sistem yang mengalami peningkatan beban di masa mendatang.

Analisis rugi-rugi sistem yang ditunjukkan pada Tabel VI makin menegaskan pentingnya optimasi tegangan dalam sistem tenaga listrik. Analisis pengurangan rugi-rugi ini menyoroti efektivitas SCA dan BA dalam mengoptimalkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada sistem. Dalam kondisi normal, rugi-rugi daya aktif tercatat sebesar 34,7 MW, sementara rugi-rugi daya reaktif tercatat sebesar 31,16 MVAR. Setelah dilakukan optimasi menggunakan SCA, rugi-rugi daya aktif turun secara signifikan menjadi 5,35 MW, yang menunjukkan pengurangan sebesar 85%. Sementara itu, rugi-rugi daya reaktif turun menjadi 2,06 MVAR, yang merupakan penurunan signifikan sebesar 93%. Peningkatan substansial ini menggarisbawahi kemampuan SCA untuk mengoptimalkan penempatan dan kapasitas DG secara efektif, sehingga menghasilkan peningkatan efisiensi sistem yang signifikan.

Di sisi lain, BA menunjukkan peningkatan yang lebih moderat. Rugi-rugi daya aktif berkurang menjadi 30,96 MW, yang berarti terjadi pengurangan sebesar 11%, sedangkan rugi-rugi daya reaktif turun menjadi 11,98 MVAR, atau hanya sekitar 11%. Meskipun BA meningkatkan profil tegangan, seperti yang telah dibahas sebelumnya, BA kurang efektif dalam meminimalkan rugi-rugi daya dibandingkan SCA. Perbedaan kinerja menunjukkan bahwa proses optimasi BA memprioritaskan stabilitas tegangan daripada pengurangan rugi-rugi daya. Sementara itu, SCA menawarkan pendekatan yang lebih seimbang, yang menangani peningkatan tegangan sekaligus pengurangan rugi-rugi daya secara komprehensif. Ketika beban sistem ditingkatkan sebesar 10%, kinerja kedua algoritma menurun. Dengan penambahan beban, metode SCA mempertahankan kinerja yang relatif kuat, dengan mampu mengurangi rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 11% dan 62%.

Hubungan antara peningkatan tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya terlihat jelas dalam konteks ini. Pengurangan rugi-rugi daya yang signifikan yang dicapai oleh SCA sejalan dengan kemampuannya untuk membawa level tegangan mendekati nilai nominal, sehingga mengurangi disipasi daya di

TABEL VI
PENGURANGAN RUGI-RUGI

Keadaan	Rugi-Rugi		Pengurangan Rugi-Rugi (%)	
	MW	MVAR	MW	MVAR
Sebelum DG	34,70	31,16	-	-
Beban normal	SCA 5,35	2,06	85	93
dengan DG	BA 30,96	11,98	11	61
Beban	SCA 30,80	11,88	11	62
ditingkatkan	BA 34,70	29,01	0	6,9
10% dengan DG				

seluruh jaringan. Sebaliknya, meskipun BA meningkatkan stabilitas tegangan pada bus tertentu, dampaknya yang relatif lebih rendah terhadap pengurangan rugi-rugi daya menunjukkan bahwa strategi optimasinya mungkin tidak sepenuhnya mengatasi area dengan disipasi daya yang tinggi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa SCA lebih unggul dari BA dalam mengoptimalkan profil tegangan dan rugi-rugi daya, menjadikannya solusi yang lebih efektif untuk meningkatkan kinerja sistem. Hasil ini menegaskan efektivitas kedua metode optimasi dalam beradaptasi dengan skenario peningkatan beban, dengan SCA sedikit mengungguli BA dalam pengaturan tegangan keseluruhan.

VI. KESIMPULAN

Analisis perbandingan algoritma SCA dan BA menunjukkan bahwa keduanya berkontribusi dalam meningkatkan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi sistem setelah integrasi DG. Algoritma SCA secara konsisten menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan algoritma BA, dengan mencapai pengurangan substansial pada rugi-rugi daya aktif dan reaktif serta mempertahankan level tegangan mendekati nilai nominal di semua skenario. Pada kondisi beban normal, SCA mampu mencapai pengurangan rugi-rugi daya aktif sebesar 85% dan pengurangan rugi-rugi daya reaktif sebesar 93%, sekaligus meningkatkan stabilitas tegangan tanpa menyebabkan *overvoltage*. Sebaliknya, metode BA, meskipun efektif dalam memitigasi tegangan rendah, justru menyebabkan sedikit *overvoltage* dan hanya mampu mencapai pengurangan rugi-rugi sistem yang moderat. Ketika mengalami peningkatan beban sebesar 10%, algoritma SCA menunjukkan ketahanan yang lebih baik dengan mempertahankan level tegangan yang dapat diterima dan mempertahankan pengurangan rugi-rugi sistem yang signifikan. Sementara itu, metode BA menunjukkan penurunan kinerja, terutama penurunan tegangan dan pengurangan rugi-rugi yang minimal. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa algoritma SCA lebih unggul dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem tenaga listrik pada kondisi beban normal maupun tinggi, menjadikannya strategi optimasi yang lebih andal dan mudah beradaptasi untuk operasi sistem tenaga listrik di masa mendatang.

Integrasi perangkat lunak ETAP untuk validasi aliran beban telah memastikan relevansi praktis dari hasil optimasi. Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi teknik optimasi gabungan dan penyertaan kekangan atau batasan dunia nyata untuk lebih meningkatkan kinerja sistem.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan terkait publikasi naskah ini. Semua penulis berkontribusi secara independen dalam penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Lindiasari Martha Yustika dan Jangkung Raharjo; metodologi, Rifki Rahman Nur Ikhsan; implemmentasi perangkat lunak dan validasi, Lindiasari Martha Yustika dan Rifki Rahman Nur Ikhsan; analisis formal dan investigasi, I.G.P.O Indra Wijaya; sumber daya dan kurasi data Lindiasari Martha Yustika, Jangkung Raharjo, Rifki Rahman Nur Ikhsan, dan I.G.P.O Indra Wijaya; pengawasan, Jangkung Raharjo.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Telkom University yang telah mendanai penelitian ini.

REFERENSI

- [1] C.D. Iweh, S. Gyamfi, E. Tanyi, dan E. Effah-Donyina, "Distributed generation and renewable energy integration into the grid: Prerequisites, push factors, practical options, issues and merits," *Energies*, vol. 14, no. 17, hal. 1–34, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175375.
- [2] L.F. Grisales-Noreña, O.D. Montoya, dan C.A. Ramos-Paja, "An energy management system for optimal operation of BSS in dc distributed generation environments based on a parallel PSO algorithm," *J. Energy Storage*, vol. 29, hal. 1–12, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101488.
- [3] S. Kumar, K.K. Mandal, dan N. Chakraborty, "A novel opposition-based tuned-chaotic differential evolution technique for techno-economic analysis by optimal placement of distributed generation," *Eng. Optim.*, vol. 52, no. 2, hal. 303–324, Feb. 2020, doi: 10.1080/0305215X.2019.1585832.
- [4] R. A. Ufa dkk., "A review on distributed generation impacts on electric power system," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 47, hal. 20347–20361, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.04.142.
- [5] J. Peng, B. Fan, dan W. Liu, "Voltage-based distributed optimal control for generation cost minimization and bounded bus voltage regulation in dc microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 1, hal. 106–116, Jan. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3013303.
- [6] A. Valencia, R.A. Hincapie, dan R.A. Gallego, "Optimal location, selection, and operation of battery energy storage systems and renewable distributed generation in medium–low voltage distribution networks," *J. Energy Storage*, vol. 34, hal. 1–16, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102158.
- [7] A. Hussain, C.-H. Kim, dan A. Mehdi, "A comprehensive review of intelligent islanding schemes and feature selection techniques for distributed generation system," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 146603–146624, Okt. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123382.
- [8] I. Khenissi dkk., "A hybrid chaotic bat algorithm for optimal placement and sizing of DG units in radial distribution networks," *Energy Rep.*, vol. 12, hal. 1723–1741, Des. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.07.042.
- [9] L.D.L. Pereira dkk., "Optimal allocation of distributed generation and capacitor banks using probabilistic generation models with correlations," *Appl. Energy*, vol. 307, hal. 1–13, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118097.
- [10] A. Ali, M.U. Keerio, dan J.A. Laghari, "Optimal site and size of distributed generation allocation in radial distribution network using multi-objective optimization," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 2, hal. 404–415, Mar. 2020, doi: 10.35833/MPCE.2019.000055.
- [11] M. Pesaran H.A., M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, dan H. Seyedi, "A hybrid genetic particle swarm optimization for distributed generation allocation in power distribution networks," *Energy*, vol. 209, hal. 1–12, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118218.
- [12] A.M. Shaheen, A.M. Elsayed, R.A. El-Sehiemy, dan A.Y. Abdelaziz, "Equilibrium optimization algorithm for network reconfiguration and distributed generation allocation in power systems," *Appl. Soft Comput.*, vol. 98, hal. 1–19, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106867.
- [13] J. Raharjo dkk., "Optimization of placement and sizing on distributed generation using technique of smalling area," dalam *2021 IEEE Elect. Power Energy Conf. (EPEC)*, 2021, hal. 475–479, doi: 10.1109/EPEC52095.2021.9621610.
- [14] D. Manna dan S.K. Goswami, "Optimum placement of distributed generation considering economics as well as operational issues," *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, vol. 30, no. 3, hal. 1–20, Mar. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12246.
- [15] R. Hidayat, A. Lomi, dan I.B. Sulistiawati, "Implementasi metode artificial bee colony untuk penempatan distributed generator pada penyulang rayon Tanjung," *J. Elect. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, hal. 113–125, Nov. 2024, doi: 10.32492/jeetech.v5i2.5202.
- [16] H.M.H. Farh, A.M. Al-Shaalan, A.M. Eltamaly, dan A.A. Al-Shamma'A, "A novel crow search algorithm auto-drive PSO for optimal allocation and sizing of renewable distributed generation," *IEEE Access*, vol. 8, hal. 27807–27820, Jan. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968462.
- [17] R. Sepehrzad dkk., "Optimal energy management of distributed generation in micro-grid to control the voltage and frequency based on PSO-adaptive virtual impedance method," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 208, hal. 1–20, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.epr.2022.107881.
- [18] H. Zayandehroodi, A. Mohamed, H. Shareef, dan M. Farhoodnea, "A novel neural network and backtracking based protection coordination scheme for distribution system with distributed generation," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, hal. 868–879, Des. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.061.
- [19] T.P. Nguyen, T.A. Nguyen, T.V.-H. Phan, dan D.N. Vo, "A comprehensive analysis for multi-objective distributed generations and capacitor banks placement in radial distribution networks using hybrid neural network algorithm," *Knowl.-Based Syst.*, vol. 231, hal. 1–34, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.knsys.2021.107387.
- [20] I. Kim, "The optimization of the location and capacity of reactive power generation units, using a hybrid genetic algorithm incorporated by the bus impedance power-flow calculation method," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, hal. 1–19, Feb. 2020, doi: 10.3390/app10031034.
- [21] D.B. Miracle, R.K. Viral, P.M. Tiwari, dan M. Bansal, "Hybrid metaheuristic model for optimal economic load dispatch in renewable hybrid energy system," *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, vol. 2023, no. 1, hal. 1–25, Apr. 2023, doi: 10.1155/2023/5395658.
- [22] K.E. Adetunji, I.W. Hofsajer, A.M. Abu-Mahfouz, dan L. Cheng, "A review of metaheuristic techniques for optimal integration of electrical units in distribution networks," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 5046–5068, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048438.
- [23] E.B. Trikora, S. Pramonohadi, dan M.I.B. Setyonegoro, "Prakiraan beban listrik menggunakan metode jaringan saraf tiruan dengan data yang terbatas," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 12, no. 3, hal. 227–232, Agu. 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.6437.
- [24] "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021 sampai dengan Tahun 2030," Menteri Energi dan Sumber daya Mineral Republik Indonesia, 2021.
- [25] "Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2016 s.d. 2025," Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, No. 5899 K/20/MEM/2016, 2016.
- [26] Z. Cui, F. Li, dan W. Zhang, "Bat algorithm with principal component analysis," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 10, no. 3, hal. 603–622, Mar. 2019, doi: 10.1007/s13042-018-0888-4.
- [27] R.M. Rizk-Allah dan A.E. Hassanien, "A comprehensive survey on the sine-cosine optimization algorithm," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. 6, hal. 4801–4858, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10462-022-10277-3.
- [28] A.B. Gabis, Y. Meraihi, S. Mirjalili, dan A. Ramdane-Cherif, "A comprehensive survey of sine cosine algorithm: variants and applications," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 54, no. 7, hal. 5469–5540, Okt. 2021, doi: 10.1007/s10462-021-10026-y.
- [29] Y. Wang dkk., "A novel bat algorithm with multiple strategies coupling for numerical optimization," *Mathematics*, vol. 7, no. 2, hal. 1–17, Feb. 2019, doi: 10.3390/math7020135.
- [30] T. Yuvaraj dkk., "Optimal integration of capacitor and distributed generation in distribution system considering load variation using bat optimization algorithm," *Energies*, vol. 14, no. 12, hal. 1–24, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123548.
- [31] N.-C. Yang dan C.-H. Tseng, "Adaptive convergence enhancement strategies for Newton-Raphson power flow solutions in distribution networks," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 18, no. 13, hal. 2339–2352, Jun. 2024, doi: 10.1049/gtd2.13197.
- [32] W. Haider dkk., "Voltage profile enhancement and loss minimization using optimal placement and sizing of distributed generation in reconfigured network," *Machines*, vol. 9, no. 1, hal. 1–16, Jan. 2021, doi: 10.3390/machines9010020.
- [33] A.T. Akindadelo dkk., "Power flow analysis using numerical computational methods on a standard IEEE 9-bus test system," *Math. Model. Eng. Probl.*, vol. 11, no. 1, hal. 18–26, Jan. 2024, doi: 10.18280/mmep.110102.