

Analisis Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan Particle Swarm Optimization untuk Meningkatkan Voltage Stability Index

Analysis of Distribution Network Reconfiguration Using Particle Swarm Optimization to Improve Voltage Stability Index

Yoakim Simamora¹, Erita Astrid², Michael Fritz Immanuel³, Bakti Dwi Waluyo⁴, Muhammad Aulia Rahman Sembiring⁵, Mega Silfia Dewy⁶, Agnes Irene Silitonga⁷, Lisa Melvi Ginting⁸

^{1,2,3,4,5,6} Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan; email: yoakimsimamora@unimed.ac.id

⁷ Jurusan Manajemen Fakultas Ekonomi Universitas Negeri Medan

⁸ Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan

[Dikirimkan: hh Bulan 20xx, Direvisi: 22 Mei 2025, Diterima: 27 Mei 2025]

Corresponding Author: Yoakim Simamora

INTISARI — Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang mendistribusikan energi listrik dari jaringan transmisi sampai ke konsumen tegangan menengah dan tegangan rendah, seperti konsumen rumah tangga, konsumen industri dan fasilitas lainnya. Rekonfigurasi jaringan adalah proses penataan ulang struktur dan konfigurasi jaringan dengan cara membuka dan menutup saklar untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang paling optimal. Pada penelitian ini penentuan buka tutup saklar menggunakan algoritma binary particle swarm optimization (BPSO), prinsip dasar algoritma BPSO dalam mencari nilai optimal berdasarkan perilaku sosial burung berkelompok atau ikan yang berenang bersama. Algoritma ini digunakan untuk menemukan solusi optimal dalam ruang multidimensi, terutama ketika masalahnya kompleks, non linear, atau tidak memiliki solusi matematis yang mudah dihitung. Kualitas pelayanan, keandalan, dan kestabilan tegangan merupakan parameter yang dijadikan tolak ukur pelayanan konsumen pada sistem distribusi tenaga listrik. Untuk mengukur stabilitas tegangan penelitian ini menyajikan Voltage stability index (VSI), perbaikan stabilitas tegangan menggunakan rekonfigurasi jaringan dengan algoritma BPSO, pada penelitian nilai VSI akan dibandingkan dengan algoritma pembandingan lain, algoritma PSO dari penelitian terdahulu, cuckoo serach algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan modified whale optimization algorithm (MWOA). Hasil simulasi menunjukkan algoritma BPSO dapat mereduksi rugi daya dari nilai awal 202,7 kW menjadi 139,3 kW atau berkurang sebesar 31,28%, dibandingkan dengan algoritma lain BPSO memiliki persentase reduksi rugi daya yang paling baik. Hasil simulasi juga menampilkan nilai VSI mengalami perbaikan dari nilai awal 0,2112 menjadi 0,1520 atau meningkat 28%, dalam perbaikan nilai VSI pada sistem distribusi IEEE 33 bus algoritma BPSO menjadi algoritma terbaik dalam peningkatan nilai VSI.

KATA KUNCI — Voltage Stability Index, Rekonfigurasi, Particle Swarm Optimiiization, Rugi Daya

ABSTRACT — The distribution system is a part of the power system that distributes electrical energy from the transmission network to medium and low voltage consumers, such as households, industrial consumers, and other facilities. Network reconfiguration is the process of restructuring and configuring the network by opening and closing switches to obtain the most optimal network configuration. In this study, the determination of switch opening and closing uses the binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm, whose basic principle in finding optimal values is based on the social behavior of birds flocking or fish swimming together. To measure voltage stability, this research presents the Voltage Stability Index (VSI), improving voltage stability using network reconfiguration with the BPSO algorithm. In this study, the VSI value will be compared with other algorithms, including the PSO algorithm from previous research, the Cuckoo Search Algorithm (CSA), the Harmony Search Algorithm (HSA), and the Modified Whale Optimization Algorithm (MWOA). The simulation results show that the BPSO algorithm can reduce power loss from an initial value of 202.7 kW to 139.3 kW, a decrease of 31.28%. Compared to other algorithms, BPSO has the best percentage reduction in power loss. The simulation results also show that the VSI value improved from an initial value of 0.2112 to 0.1520, an increase of 28%. In improving the VSI value in the IEEE 33 bus distribution system, the BPSO algorithm became the best algorithm for enhancing the VSI value.

KEYWORDS — Voltage Stabily Index, Reconfiguration, Binary Particle Swarm Optimization, Power Losses.

I. PENDAHULUAN

Jaringan distribusi adalah tahap terakhir dalam penyaluran sistem tenaga listrik. Proses ini menyalurkan daya dari sistem transmisi sampai ke konsumen. Sistem distribusi biasanya memiliki rugi daya yang tinggi dan nominal tegangan yang rendah dikarenakan karakteristiknya yang jauh dari sistem pembangkit, bentuk topologi jaringan yang umumnya radial, perbandingan resistansi dan reaktansi yang besar. Karena rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem distribusi cukup besar, menjadikan rugi daya dan jatuh tegangan menjadi masalah penting dalam sistem tenaga listrik, oleh karena itu banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengurangi rugi daya dan memperbaiki jatuh tegangan, salah satunya adalah dengan rekonfigurasi jaringan

Azad Farsani menyajikan pendekatan baru untuk mengoptimalkan sistem distribusi tenaga listrik dengan mengurangi rugi daya melalui rekonfigurasi jaringan. Artikel ini memperkenalkan algoritma hibrida yang disebut sebagai SAPSO-MSFLA, yang bertujuan untuk menemukan konfigurasi terbaik untuk jaringan distribusi secara efisien. Studi ini menyoroti tantangan metode optimisasi tradisional dalam menangani sifat diskrit dari operasi buka tutup saklar dan kebutuhan untuk penyesuaian parameter yang efektif dalam algoritma particle swarm optimization. Algoritma yang diusulkan menunjukkan konvergensi yang lebih cepat dalam simulasi dan kinerja yang lebih baik yang dilakukan pada dua pengujian distribusi, menunjukkan potensinya untuk aplikasi yang lebih luas dalam masalah optimisasi yang kompleks [1].

Mosbah menyajikan metode baru konfigurasi ulang jaringan distribusi dinamis menggunakan minimum spanning tree (MST) berdasarkan algoritma Kruskal. Rekonfigurasi adalah tugas penting dalam sistem manajemen distribusi, yang menentukan jumlah kombinasi saklar yang mungkin dan kandidat terbaik untuk konfigurasi optimal sistem distribusi. Makalah ini menyajikan formulasi matematis dari rekonfigurasi jaringan distribusi dinamis, dengan fokus pada mengurangi rugi daya dengan mempertimbangkan kendala keamanan, teknis, dan topologis. Sasaran dari konfigurasi ulang jaringan adalah untuk mengurangi rugi daya aktif dengan membuka dan menutup saklar. Makalah ini juga membahas kendala praktis dalam menerapkan konfigurasi ulang jaringan distribusi pada sistem besar, seperti jumlah saklar yang banyak dan waktu yang diperlukan untuk mencapai konfigurasi jaringan distribusi yang paling optimal yang memenuhi semua batasan. Makalah ini juga menjelaskan pentingnya teknik optimisasi yang tangguh dalam menentukan konfigurasi ulang jaringan distribusi dinamis yang optimal [2].

Penelitian terdahulu membahas penerapan rekonfigurasi jaringan optimal untuk memperbaiki level tegangan dan meminimalisasi rugi jaringan sistem distribusi menggunakan head based optimizer. Studi ini berfokus pada proses mengubah status saklar untuk mengubah topologi feeder dalam sistem distribusi. Studi ini mengusulkan cara yang ekonomis untuk memperbaiki level tegangan dan mengurangi kehilangan daya dalam sistem jaringan distribusi dengan menggunakan rekonfigurasi jaringan yang optimal pada berbagai tingkat beban jaringan. Fungsi objektif yang digunakan dalam artikel ini mencakup perbaikan profil tegangan, pengurangan kehilangan daya, pengurangan biaya operasi, dan minimisasi emisi gas. Metode yang diusulkan dievaluasi pada tiga tingkat beban yang berbeda pada sistem distribusi tegangan IEEE 33 bus, dan hasil analisis dibandingkan dengan metode optimisasi lainnya yang dipublikasikan dalam literatur. Studi ini menyimpulkan bahwa metode yang diusulkan meningkatkan profil tegangan sistem sambil meminimalkan kerugian dan biaya daya, yang menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam menemukan hasil terbaik [3].

Studi terdahulu mengusulkan metode baru untuk penempatan *Distributed Generator* (DG) berdasarkan profil tegangan rendah untuk optimisasi konfigurasi ulang jaringan dan penentuan ukuran *Distributed Generator* (DG). Metode ini terdiri dari tiga langkah: urutan switching terkategori untuk konfigurasi jaringan radial, pengumpulan konfigurasi ulang untuk mengurangi kerugian melalui alokasi DG berdasarkan lokasi geografis gardu induk, dan penentuan ukuran serta alokasi DG di setiap bus dengan profil tegangan rendah. Tujuan dari studi ini adalah untuk meningkatkan level tegangan dan meminimalkan kerugian daya jaringan dengan menggunakan pengaturan ulang jaringan, *placement dan sizing Distributed Generator* (DG), dan rekonfigurasi dan penempatan *Distributed Generator* (DG) yang dioptimalkan secara bersama [4].

Dahalan menyajikan metode Particle Swarm Optimization (PSO) untuk mengidentifikasi rencana operasi switching saklar untuk rekonfigurasi jaringan dan nilai optimum dari unit *distributed generator* (DG) secara bersamaan. Tujuan utamanya adalah meminimalisir rugi daya nyata dan memperbaiki level tegangan bus dalam sistem sambil memenuhi semua kendala distribusi. Algoritma PSO disajikan untuk menentukan konfigurasi baru yang optimal dan dampaknya terhadap rugi daya aktif jaringan serta profil tegangan. Untuk menunjukkan validitas algoritma yang diusulkan, simulasi komputer dilakukan pada sistem 33 bus dan hasilnya disajikan serta dibandingkan dengan metode *Genetic Algorithm* (GA). Permintaan yang meningkat dalam sistem tenaga telah menjadi tantangan bagi insinyur sistem tenaga dalam mempertahankan sistem yang andal dan aman secara ekonomi. Integrasi DG dalam sistem distribusi dapat meningkatkan profil tegangan, perbaikan keandalan, pasokan daya tanpa gangguan, dan efisiensi energi yang lebih tinggi. Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah salah satu skema kontrol yang paling signifikan dalam jaringan distribusi yang dapat dipengaruhi oleh interkoneksi DG [5].

Raut mishra menjelaskan *sine-cosine algorithm* yang dikombinasikan dengan levy flight untuk mengkonfigurasi ulang jaringan distribusi dan penempatan *Distributed Generator* (DG) secara simultan. Efektivitas algoritma ini diverifikasi pada 10 fungsi benchmark standar dan digunakan untuk menangani masalah optimisasi kombinatorial nyata, seperti rekonfigurasi jaringan. Permintaan beban yang meningkat di daerah industri telah menyebabkan sistem distribusi beroperasi di tepi batas stabilitas tegangan mereka, yang mengakibatkan efisiensi yang buruk dan kerugian finansial yang lebih tinggi. [6].

Liu li mengajukan algoritma hibrid baru yang menggabungkan *Harmony Search Algorithm* (HSA) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk mengatasi masalah kompleks konfigurasi ulang jaringan distribusi yang bertujuan untuk meminimalkan kehilangan daya. Makalah ini membahas menyoroti tantangan dari optima lokal dalam proses optimisasi dan menunjukkan bagaimana pendekatan hibrid meningkatkan kualitas solusi dengan memanfaatkan kekuatan kedua algoritma. Efektivitas metode ini divalidasi melalui simulasi pada sistem distribusi 33-bus dan 69-bus, menunjukkan peningkatan signifikan dalam solusi optimal dibandingkan dengan metode tradisional. Penelitian ini menekankan potensi aplikasi algoritma tersebut pada masalah optimisasi kompleks lainnya, menyoroti kontribusi inovatifnya dalam bidang sistem distribusi listrik [7].

Partha Kahyal membahas pentingnya stabilitas tegangan dalam sistem distribusi listrik dan menyajikan metode untuk meningkatkannya melalui rekonfigurasi jaringan menggunakan artificial neural network (ANN). Penelitian ini memperkenalkan indeks stabilitas tegangan untuk menilai stabilitas sistem dan menggambarkan proses pencarian dua tahap untuk konfigurasi saklar optimal yang meningkatkan stabilitas tegangan dan mengurangi kerugian daya. Studi ini menunjukkan bahwa setelah rekonfigurasi, kehilangan daya aktif dan reaktif dalam sistem distribusi 52-bus yang praktis berkurang secara signifikan, yang mengarah pada profil tegangan yang lebih baik di seluruh jaringan. Temuan tersebut menyoroti efektivitas pendekatan berbasis ANN yang diusulkan dalam mencapai efisiensi operasional dan keandalan yang lebih baik dalam jaringan distribusi [8].

Mistry mengusulkan metode baru untuk rekonfigurasi jaringan per jam pada jaringan distribusi radial 16-node dan 33-node untuk satu hari dengan rekonfigurasi jaringan yang mempertimbangkan model beban statis. Indeks stabilitas tegangan minimum ditemukan pada node yang memiliki profil tegangan rendah dan kerugian yang lebih tinggi. Sistem distribusi menghadapi masalah seperti penyeimbangan beban, pengurangan kerugian, profil tegangan rendah di ujung konsumen, dan ketidakstabilan tegangan akibat peningkatan permintaan energi yang progresif. Rekonfigurasi jaringan dapat meningkatkan stabilitas tegangan dengan mengubah topologi jaringan, mengurangi kehilangan daya sistem, meningkatkan level tegangan, dan memperbaiki keandalan sistem [9].

Mohammed Imran menyajikan pendekatan baru untuk mengoptimalkan rekonfigurasi jaringan distribusi yang bertujuan untuk meminimalkan kerugian daya dan meningkatkan profil tegangan. Penelitian ini memperkenalkan Fireworks Algorithm (FWA), teknik optimasi berbasis kecerdasan kawanan yang terinspirasi oleh proses ledakan kembang api, yang secara efektif menangani sifat kombinatorial kompleks dari rekayasa ulang jaringan sambil memastikan struktur radial sistem tetap terjaga. Metode ini diuji pada sistem uji standar IEEE, khususnya sistem 33-bus dan 119-bus, menunjukkan hasil yang lebih dibandingkan dengan metode algoritma dalam hal kualitas solusi, kecepatan konvergensi, dan efisiensi komputasi. Hasilnya menunjukkan bahwa FWA secara signifikan mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas tegangan, bahkan dalam kondisi abnormal, menunjukkan efektivitasnya dalam jaringan distribusi berskala besar [10].

Makalah ini membahas Voltage Stability Index (VSI) dari jaringan distribusi radial, yang mengalami perubahan signifikan dalam variasi beban setiap hari. Beberapa node dengan indeks stabilitas minimum dipilih terlebih dahulu, dan node dengan nilai minimum dinyatakan sebagai node yang paling sensitif. Studi ini juga mengidentifikasi nilai kritis dari total beban nyata dan total beban daya reaktif untuk berbagai kasus, mengungkapkan bahwa sistem akan runtuh di luar nilai kritis daya yang telah dihitung. Node yang paling sensitif adalah yang menunjukkan titik kritis tertinggi, margin daya reaktif terendah, defisiensi daya reaktif terbesar, dan perubahan % tegangan tertinggi.

Penelitian ini mengusulkan metode metaheuristik Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) yang terinspirasi perilaku sekelompok burung atau sekelompok ikan dalam karakteristiknya mencari makanan. Pendekatan algoritma PSO digunakan untuk menentukan saklar yang terbuka dan tertutup untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang paling optimal. Tujuan dari studi ini adalah untuk meminimalisasi kerugian daya aktif dan meningkatkan profil tegangan, setelah konfigurasi jaringan optimal diperoleh dengan rugi daya yang minimal langkah berikutnya adalah menganalisis Voltage Stability Index (VSI) dari jaringan distribusi hasil rekonfigurasi. Metode ini akan diuji pada sistem distribusi IEEE 33 bus, hasil dari analisis dan simulasi akan dibandingkan dengan algoritma pembandingan lain, algoritma PSO dari penelitian terdahulu, Cucko Search Algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan Modified Whale Optimization Algorithm (MWOA)

II. METODE PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan tentang fungsi objektif yang akan dicapai dari metode yang diajukan, batasan - batasan yang harus dipenuhi dalam analisis, algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) sebagai metode yang digunakan untuk menentukan saklar yang terbuka dan tertutup untuk mendapatkan konfigurasi baru jaringan, Voltage Stability Index (VSI) sebagai parameter kualitas daya yang akan dianalisis setelah rekonfigurasi jaringan dilakukan, dan data penelitian menggunakan sistem IEEE 33 bus dengan level tegangan 12,6 kV.

A. FUNGSI OBJEKTIF

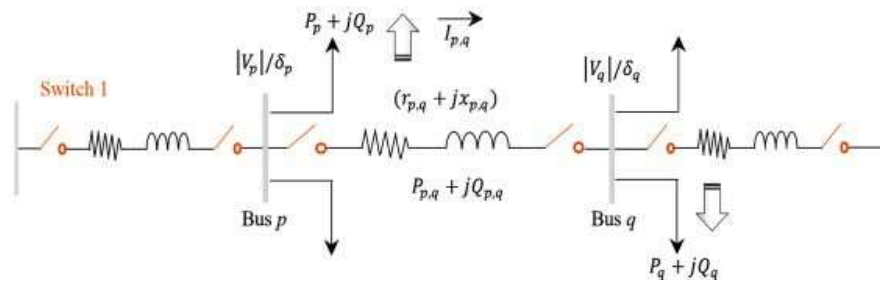
Fungsi objektif adalah fungsi matematis yang digunakan untuk memperoleh hasil terbaik dalam analisis aliran daya. Fungsi objektif dalam makalah ini adalah untuk mengurangi rugi daya aktif, meningkatkan profil tegangan, dan meningkatkan nilai VSI. Persamaan (1) adalah persamaan fungsi objektif untuk mengurangi rugi daya aktif.

$$\text{Min } F = \min (P_{\text{loss}} + (\lambda_v \times S_{CV})) \quad (1)$$

Dimana Min F adalah *minimum function*, Ploss adalah rugi jaringan yang didapatkan menggunakan persamaan (2), λ_v adalah penalti faktor. S_{CV} adalah jumlah dari tegangan yang melanggar batasan tegangan (*Constraint*). Nilai penalti faktor didapatkan sebagai berikut :

$$\lambda_v = \begin{cases} 0, & \text{jika batasan tegangan tidak dilanggar} \\ 1, & \text{jika batasan tegangan dilanggar} \end{cases}$$

Untuk menghitung rugi jaringan, analisis aliran daya adalah langkah pertama yang dilakukan untuk menghitung parameter yang tidak diketahui (tegangan pada bus beban, arus yang mengalir pada penghantar, dan daya reaktif pada pembangkit) menggunakan aliran daya *Bus Injection to Branch Current* (BIBC) dan *Branch Current to Branch Voltage* (BCBV). Gambar 1 menjelaskan diagram satu garis jaringan distribusi radial, impedansi penghantar jaringan disribusi diantara bus p dan bus q [2].



Gambar 1. Penghantar Jaringan Distribusi

$$P_{loss}(t) = I_{pq}^2 R_{pq} = \frac{S_{pq}^2}{V_p^2} R_{pq} = \frac{P_{pq}^2 + Q_{pq}^2}{V_p^2} R_{pq} \quad (2)$$

Dimana $P_{loss}(t)$ adalah total rugi daya jaringan pada saat t , V_p/δ_p adalah tegangan dan sudut fase tegangan pada bus p , x_{pq} dan r_{pq} adalah reaktansi dan resistansi pada saluran diantara bus p dan bus q , sedangkan Q_{pq} dan P_{pq} adalah daya reaktif dan daya aktif menuju bus i^{th} , dan N adalah jumlah bus pada sistem. Studi ini memiliki 3 batasan dalam proses analisis yaitu

Batasan tegangan : $V_{min} < V_i < V_{max}$; $i =$ nomor bus

Batasan arus : $I_{min} < I_i < I_{max}$; $i =$ nomor cabang

Batasan topologi dalam penelitian ini adalah setelah konfigurasi ulang jaringan, bentuk jaringan masih berbentuk radial, tidak ada berbentuk loop. Dimana P_{loss} adalah total rugi daya dalam sistem, I_i magnitude arus yang mengalir melalui cabang i , V_i tegangan bus i

B. ALGORITMA BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Kennedy dan Eberhart memperkenalkan Algoritma Swarm Optimization (PSO) pada tahun 1995. PSO adalah algoritma optimisasi berbasis AI yang didasarkan pada kecerdasan koloni ikan dan burung [11]. Persamaan (6) dan (7) menunjukkan algoritma PSO standar.

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 \cdot rand(p_p - x_i(t)) + c_2 \cdot rand(p_g - x_i(t)) \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

Proses yang diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart [12] menghasilkan variasi PSO. Persamaan update partikel menjadi persamaan (8) ketika inersia berat ditambahkan sebagai pengontrol keragaman dari PSO awal.

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot rand(p_p - x_i(t)) + c_2 \cdot rand(p_g - x_i(t)) \quad (8)$$

Persamaan inersia berat yang digunakan adalah seperti persamaan (9), di mana w adalah inersia berat yang memiliki nilai yang berbeda untuk setiap iterasi.

$$w_{It} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \cdot It}{It_{maks}} \quad (9)$$

Optimasi *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) adalah teknik optimasi lanjutan yang berasal dari algoritma *Particle Swarm Optimization* standar (PSO), yang dirancang khusus untuk mengatasi tantangan dalam ruang pencarian biner. Kegunaan BPSO yang signifikan terletak pada aplikasinya dalam rekonfigurasi jaringan distribusi, sebuah proses penting untuk mengoptimalkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi listrik. Dengan meniru pola perilaku sosial yang diamati di alam, seperti burung yang terbang berkelompok atau ikan yang berenang berkelompok, BPSO memungkinkan identifikasi konfigurasi jaringan optimal yang meminimalkan kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas tegangan.

Dalam BPSO, P_i dan P_g dari swarm diupdate dalam PSO standar. Satu perbedaan utama antara BPSO dan PSO standar adalah interpretasi kecepatan [13]. Pada BPSO, kecepatan dibatasi dalam kisaran $[0,1]$. Persamaan kecepatan serupa dengan persamaan 10.

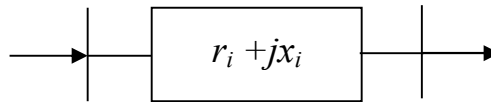
$$v_{ij}'(t) = sig((t)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}} \quad (10)$$

Persamaan (10) digunakan untuk memperbarui vektor kecepatan partikel. Dan posisi baru partikel diperoleh dengan menggunakan persamaan (11).

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{ij} < sig(v_{ij}(t+1)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

C. VOLTAGE STABILITY INDEX

Penelitian ini mengusulkan (VSI) baru yang dapat menilai keadaan sistem distribusi dari sisi voltage collapse. Operator sistem selalu ingin mengetahui seberapa jauh jaringan dari titik voltage collapse agar sistem tenaga dapat berjalan dengan lancar dan handal ini didasarkan pada solusi persamaan kuadrat sederhana [14]. Model rangkaian ekuivalen dapat digunakan untuk mewakili setiap cabang $ri + jxi$ antara bus: i dan bus: $i+1$ dari sistem distribusi radial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [15].



Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen Sistem Distribusi Dua bus

VSI yang diusulkan dapat digunakan untuk menentukan tingkat stabilitas tegangan dari sistem interkoneksi total. Menurut model ini, jika nilai indeksnya dekat dengan nol, sistem dianggap stabil [15]. V_{i+1} adalah tegangan penerima, dan P_{i+1} dan Q_{i+1} adalah daya aktif dan reaktif total dari total beban. Selain itu, r_i dan x_i adalah model sirkuit ekuivalen, yang ditemukan dengan menghitung total kehilangan daya aktif dan reaktif dalam (12) dan (13). Simbol P_1 dan Q_1 mewakili total pembangkitan daya aktif dan reaktif, dan V_i adalah tegangan pengiriman. Persamaan (14) menunjukkan persamaan untuk menghitung VSI, nilai VSI harus lebih kecil atau sama dengan 1 [8].

$$P_L = r_{eq} \left(\frac{P_S^2 + Q_S^2}{V_S^2} \right) \tag{12}$$

$$Q_L = x_{eq} \left(\frac{P_S^2 + Q_S^2}{V_S^2} \right) \tag{13}$$

$$L = 4 \cdot \sqrt{(P_S^2 + Q_S^2) \cdot (r_{eq}^2 + x_{eq}^2)} \tag{14}$$

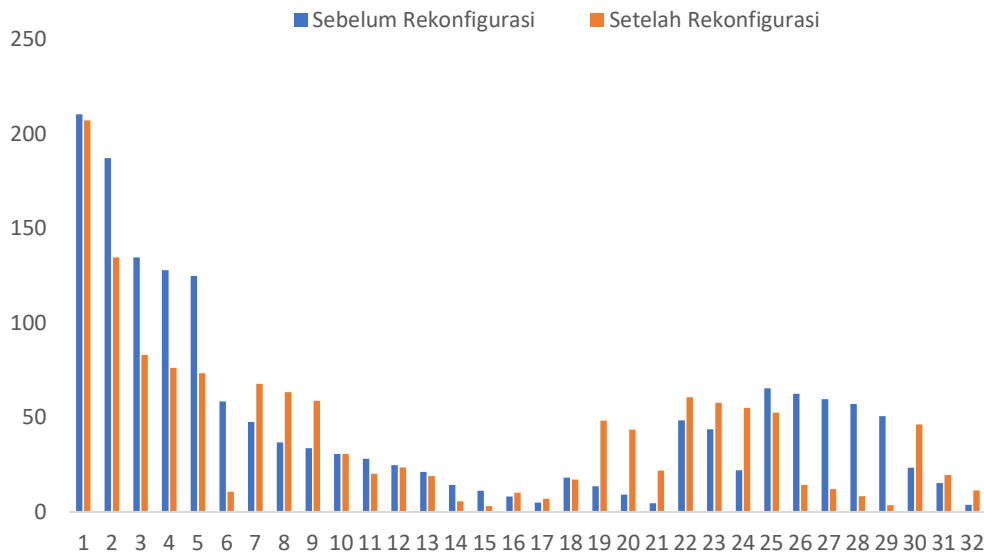
III. HASIL DAN ANALISIS

Algoritma BPSO akan diuji coba pada sistem distribusi IEEE 33 bus untuk mendapatkan konfigurasi jaringan yang paling optimal dengan rugi daya paling minimum dan nilai VSI yang paling optimum. Algoritma BPSO yang diajukan pada penelitian ini akan dibandingkan algoritma PSO dari penelitian terdahulu, Cucko Search Algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan Mean Whole Optimization Algorithm (MWOA). Sistem distribusi IEEE 33 bus terdiri dari 32 sectionalize switch dengan nomor switch 1-32 dan 5 tie switch dengan nomor switch 33-37, single line diagram sistem distribusi 33 bus dengan 5 loop (loop 1 sampai loop 5) ditunjukkan pada gambar 4 [16]. Data impedansi saluran diambil dari [17] dengan total daya aktif sebesar 3715 kW dan total daya reaktif sebesar 2300 kVAR. Kondisi awal rugi daya dari sistem distribusi IEEE 33 bus adalah sebesar 202,7 kW, tegangan minimum sebesar 0,9166 pada bus 18, dan nilai VSI sebesar 0,2112. Penentuan loop dari sistem distribusi juga perlu diperhatikan, agar tidak ada satu switch yang dimasukkan ke dalam 2 loop yang berbeda [18]. Tabel I menjelaskan loop dasar pada sistem distribusi IEEE 33 bus.

TABEL I
LOOP DASAR JARINGAN DISTRIBUSI IEEE 33 BUS

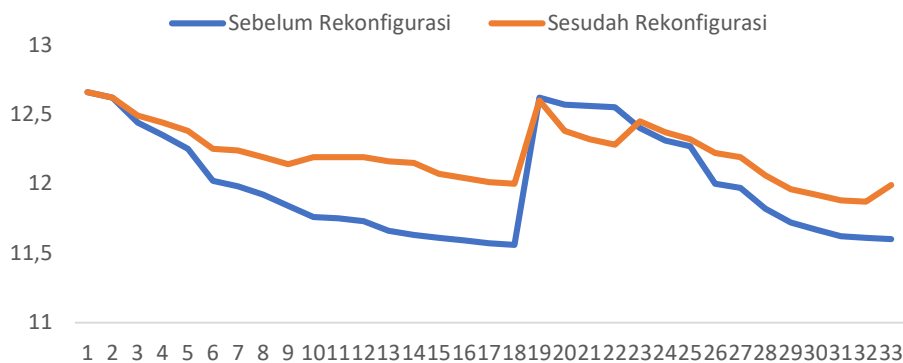
Loop	Switch OFF	Jumlah Switch
1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 33	10
2	8, 9, 10, 11, 21, 35	6
3	12, 13, 14, 34	4
4	15, 16, 17, 29, 30, 31, 32, 36	8
5	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37	8

Untuk menganalisis performa dari algoritma yang diajukan, hasil simulasi dibandingkan dengan hasil algoritma lainnya, PSO 1 [5], PSO 2 [4], *Cucko Search Algoritim* (CSA) [19], *Harmony Search Algorithm* (HSA) [7], dan *Modified Whale Optimization Algorithm* (MWOA) [20]. Hasil dari algoritma pembandingan akan dijalankan dengan metode aliran daya yang diajukan pada penelitian ini dengan konfigurasi *tie switch* yang dihasilkan dari algoritma pembandingan dan ditampilkan pada tabel I. Dari tabel II terlihat bahwa untuk reduksi rugi daya dan peningkatan nilai VSI algoritma BPSO mengungguli algoritma, PSO, CSA, HSA dan MWOA. Dari hasil rekonfigurasi jaringan menggunakan algoritma BPSO diperoleh *tie switch* yang baru, konfigurasi jaringan yang baru berhasil mengurangi rugi daya dari 202,7 kW menjadi 139,3 kW atau berkurang sebesar 31,28%, setelah diperoleh rugi daya dilakukan analisis nilai VSI, setelah konfigurasi baru nilai VSI berukuran dari 0,2112 menjadi 0,1520 atau berkurang sebesar 28%.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Arus Menuju Bus Pada Sistem Distribusi Sebelum dan Sesudah Rekonfigurasi

Gambar 4 menyajikan perbandingan nilai arus yang mengalir pada saluran distribusi menuju ke bus beban pada sistem distribusi untuk kondisi awal dan hasil rekonfigurasi menggunakan algoritma BPSO, Nilai arus yang mengalir pada saluran distribusi kondisi awal lebih besar dibandingkan dengan arus saluran distribusi setelah rekonfigurasi menggunakan BPSO.



Gambar 5. Perbandingan Tegangan Tiap Bus Sebelum dan Sesudah Rekonfigurasi

Gambar 5 menampilkan grafik profil tegangan sistem distribusi IEEE 33 bus sebelum dan sesudah rekonfigurasi, sebelum rekonfigurasi profil tegangan terendah sebesar 0,9166 pu pada bus 18, setelah rekonfigurasi jaringan profil tegangan terendah meningkat menjadi 0,9378 atau meningkat sebesar 22,61%.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini mengajukan algoritma BPSO untuk menyelesaikan permasalahan rekonfigurasi jaringan distribusi dengan tujuan meningkatkan profil tegangan, mengurangi rugi daya jaringan dan meningkatkan nilai VSI pada sistem distribusi. Algoritma yang diajukan telah di uji coba pada sistem distribusi IEEE 33 bus dan hasilnya telah dibandingkan dengan algoritma optimasi pembandingan PSO dari penelitian terdahulu, CSA, HSA, dan MWOA yang tersedia dari literatur. Hasil simulasi menunjukkan metode BPSO lebih baik dalam menentukan konfigurasi jaringan paling optimal sehingga dapat menurunkan rugi daya dan

meningkat nilai VSI dibanding dengan algoritma pembandingan lain. Hasil simulasi menunjukkan rugi daya jaringan berkurang 31,28% sedangkan nilai VSI meningkat sebesar 22,61%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis dengan ini menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara pribadi, institusional, maupun komersial, yang dapat memengaruhi objektivitas dan integritas dalam pelaksanaan penelitian berjudul “Analisis Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan *Particle Swarm Optimization* untuk Meningkatkan *Voltage Stability Index*”. Seluruh tahapan penelitian, mulai dari perancangan, pengumpulan data, analisis hingga pelaporan hasil, dilakukan secara mandiri dan bebas dari intervensi pihak manapun

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih untuk LPPM Universitas Negeri Medan yang turut membantu dalam penyelesaian makalah ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada reviewer yang memberikan rekomendasi dalam peningkatan kualitas makalah.

REFERENSI

- [1] T. Niknam and E. Azad Farsani, “A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 8, pp. 1340–1349, 2010, doi: 10.1016/j.engappai.2010.02.005.
- [2] M. Mosbah, S. Arif, R. D. Mohammedi, and A. Hellal, “Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm,” *2017 5th Int. Conf. Electr. Eng. - Boumerdes, ICEE-B 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ICEE-B.2017.8192170.
- [3] D. Otuo-Acheampong, G. I. Rashed, A. M. Akwasi, and H. Haider, “Application of Optimal Network Reconfiguration for Loss Minimization and Voltage Profile Enhancement of Distribution System Using Heap-Based Optimizer,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9930954.
- [4] M. N. M. Nasir, N. M. Shahrin, Z. H. Bohari, M. F. Sulaima, and M. Y. Hassan, “A Distribution Network Reconfiguration Based on PSO : Considering DGs Sizing and Allocation Evaluation for Voltage Profile Improvement”.
- [5] W. Dahalan, “Network reconfiguration for loss reduction with distributed generations using PSO”, in *Proceedings of International conference on Power and Energy*, no. December, pp. 1–7, 2012.
- [6] U. Raut and S. Mishra, “An improved sine-cosine algorithm for simultaneous network reconfiguration and DG allocation in power distribution systems,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 92, p. 106293, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106293.
- [7] L. Liu, H. Yu, and L. Li, “Distribution network reconfiguration based on harmony search/genetic hybrid algorithm,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. Ciced, pp. 5–6, 2012, doi: 10.1109/CICED.2012.6508726.
- [8] I. Journal and E. Engineering, “International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 4, Number 1, March 2012,” vol. 4, no. 1, pp. 120–133, 2012.
- [9] K. Mistry and R. Roy, “Enhancement of Voltage Stability Index of distribution system by network reconfiguration including static load model and daily load curve,” *2011 IEEE PES Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT India 2011*, pp. 17–22, 2011, doi: 10.1109/ISGT-India.2011.6145379.
- [10] A. Mohamed Imran and M. Kowsalya, “A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 312–322, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034.
- [11] L. Vanneschi and S. Silva, “Particle Swarm Optimization,” *Nat. Comput. Ser.*, pp. 105–111, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-17922-8_4.
- [12] C. Wu and M. S. Tsai, “Feeder reconfiguration using binary coding particle swarm optimization,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 488–494, 2008.
- [13] S. Biswas, A. Chatterjee, and S. K. Goswami, “An artificial bee colony based optimal placement and sizing of distributed generation,” *Int. Conf. Control. Instrumentation, Energy Commun. CIEC 2014*, pp. 356–360, 2014, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959109.
- [14] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, and X. Yang, “Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 2775–2786, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.01.004.
- [15] R. Arunjothi and K. P. Meena, “Optimizing capacitor size and placement in radial distribution networks for maximum efficiency,” *Syst. Soft Comput.*, vol. 6, no. June, p. 200111, 2024, doi: 10.1016/j.sasc.2024.200111.
- [16] T. T. Nguyen, P. N. Vinh, and H. D. Nguyen, “Optimizing location and size of capacitors for power loss reduction in radial distribution networks,” vol. 19, no. 1, 2021, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v19i1.16491.
- [17] rio afrianda Yoakim Simamora, Sigit sukamajati, “Optimasi Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial,” *J. Energi Kelistrikan*, vol. 10, no. 2, pp. 102–111, 2018.
- [18] S. Adeleke, O. Ighodalo, O. Olatunde, T. Grace, and T. Ejike, “Franklin Open Optimal allocation of shunt capacitors in radial distribution networks using Constriction-Factor Particle Swarm Optimization and its techno-economic analysis,” *Franklin Open*, vol. 7, no. September 2023, p. 100093, 2024, doi: 10.1016/j.fraope.2024.100093.
- [19] T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. A. Phung, “A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 801–815, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030.
- [20] A. Uniyal and S. Sarangi, “Optimal network reconfiguration and DG allocation using adaptive modified whale optimization algorithm considering probabilistic load flow,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, no. April 2019, p. 106909, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2020.106909.