

PENINGKATAN VOLTAGE STABILITY DENGAN PEMASANGAN PEMBANGKITAN TERSEBAR PADA SISTEM DISTRIBUSI AREA YOGYAKARTA MENGGUNAKAN FLOWER POLLINATION ALGORITHM

Fredi Prima Sakti^{*)} dan MS Hendriyawan Achmad

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains & Teknologi, Universitas Teknologi Yogyakarta
Jalan Siliwangi, Jl. Ringroad Utara, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55285, Indonesia

^{*)} E-mail: fredipsakti@staff.uty.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas tentang penempatan dan kapasitas dari pembangkitan tersebar (*distributed generation – DG*) yang optimal di sistem kelistrikan area Yogyakarta untuk meningkatkan kestabilan tegangan menggunakan *Flower Pollination Algorithm*. Indeks kestabilan tegangan yang digunakan yaitu *Fast Voltage Stability Index (FVSI)*. Indeks ini dikembangkan berdasarkan pengukuran tegangan dan daya reaktif. FVSI merupakan indeks saluran yang diturunkan dari persamaan umum arus yang mengalir pada saluran antara dua bus. Sistem kelistrikan area Yogyakarta terdiri dari 9 bus dan 8 saluran. Jenis pembangkit yang digunakan yaitu tipe yang hanya mampu menyuplai daya reaktif. Jumlah pembangkitan tersebar yang akan diteliti berjumlah dua buah dengan kapasitas maksimal 50 MVar. *Flower Pollination Algorithm (FPA)* adalah teknik optimasi metaheuristik baru dan terinspirasi oleh strategi reproduksi dari proses penyerbukan tanaman berbunga. Hasil yang didapat dari penelitian ini yaitu, pemasangan DG yang optimal terletak di Gardu Induk (GI) Gejayan (bus 3) sebesar 24.9095 MVAR dan GI Semanu (bus 8) sebesar 9.52361 MVAR. Iterasi dilakukan sebanyak 300 kali dengan hasil konvergen. Dari pemasangan DG tersebut mayoritas saluran mengalami peningkatan dari sisi kestabilan tegangan nya, hal tersebut ditandai dengan menurunnya nilai FVSI. Dari semua saluran, setelah dipasang DG maka sistem mengalami peningkatan kestabilan tegangan dengan rata-rata penurunan FVSI sebesar 22.15%

Kata kunci: distributed generation, flower pollination algorithm, fast voltage stability index.

Abstract

This study discusses the optimal placement and capacity of distributed generation (DG) in the Yogyakarta area electrical system to increase voltage stability using the Flower Pollination Algorithm. The voltage stability index used is the Fast Voltage Stability Index (FVSI). This index is developed based on the measurement of reactive voltage and power. FVSI is a line index that is derived from the general equation for the current flowing in the line between two buses. Yogyakarta area's electricity system consists of 9 buses and 8 lines. The type of generator used is the type which can only supply reactive power. The number of distributed generation to be studied is two with a maximum capacity of 50 MVAR. Flower Pollination Algorithm (FPA) is a new metaheuristic optimization technique and is inspired by the reproductive strategy of pollinating flowering plants. The results obtained from this study, namely, the optimal installation of DG is located at GI Gejayan (bus 3) of 24,9095 MVAR and GI Semanu (bus 8) of 9.52361 MVAR. Iterations were carried out 300 times with convergent results. From the DG installation the majority of the lines experiencing an increase in voltage stability, this is indicated by a decrease in the FVSI value. Of all the lines, after DG was installed, the system experienced an increase in voltage stability with an average decrease in FVSI of 22.15%.

Keywords: distributed generation, flower pollination algorithm, fast voltage stability indeks.

1. Pendahuluan

Pembangkitan tersebar atau yang dikenal dengan istilah *Distributed Generation (DG)* merupakan suatu pembangkit listrik dengan skala kecil yang dipasang pada sistem distribusi. Pemasangan DG pada sistem distribusi mempunyai manfaat seperti pengurangan rugi daya pada

saluran, peningkatan nilai tegangan, peningkatan keandalan, serta peningkatan kestabilan tegangan [1]–[3]. Kestabilan tegangan suatu sistem tenaga listrik dapat diukur dan dinyatakan ke suatu indeks yang disebut dengan indeks kestabilan tegangan (*Voltage Stability Index*). Indeks ini dapat digunakan untuk pertimbangan penempatan dan kapasitas DG, mendeteksi jalur dan bus

yang lemah dan menjadi tindakan penanggulangan terhadap ketidakstabilan tegangan.

Penelitian ini membahas mengenai pembangkitan tersebar (DG) yang umum digunakan di sistem distribusi dan transmisi yang menyediakan dukungan daya reaktif untuk meningkatkan stabilitas sistem dan kualitas daya. Ada banyak penelitian yang dilaporkan dalam literatur tentang strategi penempatan DG [1], [2], [4]–[8]. Penulis [1], [2], [5] memecahkan masalah penempatan DG dengan mempertimbangkan stabilitas tegangan jaringan listrik. Pemasangan beberapa DG dilakukan secara bertahap dan penambahan unit DG lainnya dilakukan saat sistem membutuhkannya. Penulis [4] mengalokasikan pembangkit PV (*Photo Voltaic*) dan penyimpanan baterai untuk memulihkan sistem setelah kejadian ekstrim. PV yang merupakan salah satu bentuk dari DG digunakan untuk memulihkan sistem yang ditempatkan secara strategis di lokasi tertentu dengan menggunakan perkiraan pemadaman berdasarkan data pemadaman historis.

Penelitian ini akan menggunakan *Flower Pollination Algorithm* (FPA) untuk menentukan lokasi dan kapasitas DG yang optimal dengan tujuan mendapatkan stabilitas tegangan yang terbaik. FPA merupakan algoritma yang dikembangkan oleh Xin-She Yang pada 2012 [9]. FPA merupakan algoritma meta-heuristik yang terinspirasi oleh fenomena alam terkait dengan penyerbukan bunga.

FPA dipilih untuk menyelesaikan permasalahan tersebut karena algoritma tersebut diklaim mempunyai performa yang lebih baik dari algoritma yang saat ini banyak digunakan seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA) jika dilihat dari jumlah iterasi dan rating keberhasilannya dalam mencari global optimum [9].

Sistem kelistrikan di area Yogyakarta terdiri dari 9 gardu induk dan 8 saluran yang saling terhubung diantara gardu induk tersebut. Sistem kelistrikan di Yogyakarta menjadi menarik dikarenakan tidak adanya bus pembangkit pada sistem ini, ditambah pertumbuhan beban yang mencapai 4,3% di tahun 2018 menjadi tantangan bagi stabilitas tegangan agar tidak terjadi *voltage collapse* [10]

2. Metode

2.1. Fungsi Obyektif

Fungsi obyektif pada permasalahan ini yaitu mendapatkan kestabilan tegangan yang tinggi yang dilihat dari indikator indeks kestabilan tegangan yang rendah. ditambah dengan fungsi penalti. Fungsi penalti digunakan untuk menjaga agar nilai yang dihasilkan tetap sesuai dengan batas-batas yang diizinkan. Secara umum, fungsi didefinisikan oleh persamaan 1:

$$\text{Min FVSI} = \sum_{k=1}^{n_b} \text{FVSI}_k + \text{Penalti} \quad (1)$$

Dimana FVSI_k merupakan indeks kestabilan tegangan pada saluran ke- k , n_b merupakan banyaknya saluran yang ada pada sistem. Penalti akan dijelaskan pada (7).

2.1.1. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dapat dimodifikasi yang berfungsi untuk mendapatkan nilai fungsi obyektif yang paling minimal. Dalam hal ini fungsi obyektif yang dicari yaitu indeks kestabilan tegangan FVSI pada saluran. Nilai dari variabel kontrol tidak boleh melebihi ambang batas yang dimiliki oleh setiap variabel kontrol. Variabel kontrol pada permasalahan ini yaitu daya reaktif yang dibangkitkan dan lokasi pemasangan DG.

2.1.2. Batasan Fungsi Obyektif

Batasan pada penelitian ini diklasifikasikan menjadi kendala bentuk persamaan dan batasan bentuk pertidaksamaan. Secara rinci akan dijelaskan di bagian selanjutnya.

2.1.2.1. Batasan Bentuk Persamaan

Dalam kasus ini ingin didapatkan rugi daya pada saluran yang seminimal mungkin, namun demikian harus dipastikan bahwa total daya yang dibangkitkan harus sama dengan total beban ditambah dengan rugi daya pada saluran transmisi secara keseluruhan. Batasan bentuk persamaan sering dikenal sebagai persamaan keseimbangan daya (*Power Balance Equation*) [11] yang dijelaskan melalui persamaan 2 dan 3 berikut:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n_b} V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{n_b} V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

Keterangan:

P_{Gi} = Total daya aktif yang dibangkitkan oleh generator pada bus-i.

P_{Di} = Total daya aktif beban pada bus-i.

Q_{Gi} = Total daya reaktif yang dibangkitkan oleh generator pada bus-i.

Q_{Di} = Total daya aktif beban pada bus-i.

V_i = Magnitud tegangan pada bus-i.

V_j = Magnitud tegangan pada bus-i.

g_{ij} = Konduktansi saluran antara bus-i dan bus-j.

b_{ij} = Suseptansi saluran antara bus-i dan bus-j.

θ_{ij} = Perbedaan sudut tegangan antara bus i dan j.

n_b = Jumlah bus pada sistem.

2.1.2.2. Batasan DG

Batasan pada DG merupakan variabel pada DG yang memiliki batasan nilai yang terdiri dari daya reaktif serta magnitud tegangan pada semua DG. Batasan ini diterapkan ke semua unit DG yang terkoneksi ke sistem. Seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 4 dan 5.

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, I=1, \dots, N_G \quad (4)$$

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max}, I=1, \dots, N_G \quad (5)$$

Q_{Gi} merupakan daya reaktif yang dibangkitkan generator ke- i , Q_{Gi}^{min} dan Q_{Gi}^{max} secara berturut-turut merupakan batas minimal dan maksimal daya reaktif yang dimiliki generator ke- i . Sedangkan V_{Gi} merupakan magnitud tegangan pada bus pembangkit ke- i , V_{Gi}^{min} dan V_{Gi}^{max} secara berturut-turut merupakan batas minimal dan maksimal magnitud tegangan pada bus pembangkit ke- i . N_G merupakan jumlah pembangkit pada sistem.

2.1.2.3. Batasan Keamanan

Batasan keamanan terdiri dari magnitud tegangan pada semua bus dan batasan kapasitas saluran pada sistem. Besarnya tegangan harus dalam kisaran yang diijinkan. Nilai-nilai ini harus dipertahankan untuk memastikan kualitas sistem tenaga listrik. Seperti ditunjukkan oleh persamaan 6.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, i=1, \dots, N_{bus} \quad (6)$$

V_i merupakan nilai magnitud tegangan pada bus ke- i , nilai V_i merupakan nilai magnitud tegangan di semua bus kecuali bus bus pembangkit.

Semua batasan dari persamaan 2 – 6 ditambahkan ke fungsi tujuan menggunakan fungsi penalti. Fungsi penalti diperoleh dengan mengalikan faktor penalti menjadi kuadrat perbedaan antara nilai variabel dan nilai batas. Solusi yang melanggar kendala akan memiliki nilai rugi daya saluran yang tinggi sehingga akan ditolak menjadi solusi terbaik. Secara matematis, fungsi penalti dinyatakan oleh persamaan 7.

$$\text{Penalti} = \lambda_P (P_{G1} - P_{G1}^{lim})^2 + \lambda_V \sum_{i=1}^{N_{bus}} (V_i - V_i^{lim})^2 + \lambda_{Qg} \sum_{i=1}^{N_G} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{lim})^2 \quad (7)$$

λ_P , λ_V , dan λ_{Qg} adalah faktor penalti dari setiap variabel yang nilainya berbeda. Faktor hukuman dipilih dengan hati-hati karena akan menentukan solusi terbaik. Sementara X^{lim} adalah nilai batas dari setiap variabel yang terdiri dari batas atas dan bawah. Jika nilai X lebih besar dari batas atas, maka X^{lim} ditetapkan sebagai batas atas. Namun, jika nilai X lebih rendah dari batas bawah, maka X^{lim} ditetapkan sebagai batas bawah. Nilai batas dijelaskan oleh persamaan 8:

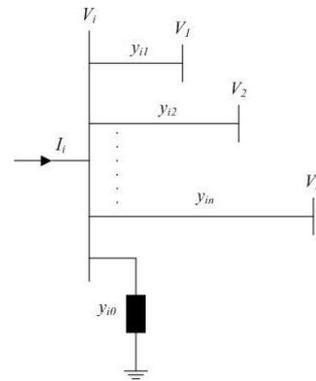
$$X^{lim} = \begin{cases} X^{max}; & X > X^{max} \\ X^{min}; & X < X^{min} \end{cases} \quad (8)$$

2.2. Aliran Daya

Pada penelitian ini tidak bisa terlepas dari aliran daya yang secara umum dikenal sebagai aliran beban. Pada aliran

daya akan didapatkan nilai dari magnitud tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif, daya reaktif, rugi-rugi daya saluran. Aliran daya diperlukan untuk tujuan perencanaan, penjadwalan ekonomis, dan pengontrolan pada sistem yang sudah ada, demikian juga untuk tujuan rencana pengembangan sistem. Masalah utamanya terdiri atas menentukan magnitud dan sudut fase tegangan pada setiap bus serta menentukan daya aktif dan reaktif di setiap saluran transmisi.

Dalam menyelesaikan suatu masalah aliran daya, sistem diasumsikan beroperasi pada kondisi stabil dan digunakan model satu fase. Empat parameter yang terkait dengan masing-masing bus, yaitu magnitud tegangan $|V|$, sudut fase tegangan θ , daya aktif P , dan daya reaktif Q .



Gambar 1. Bus pada sistem tenaga listrik

Aplikasi Hukum Arus Kirchoff (HAK) seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 1 akan menghasilkan persamaan 9 dan 10 berikut:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) = (y_{i0} + y_{i1} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (9)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j; j \neq I \quad (10)$$

Daya aktif dan reaktif yang mengalir pada bus- i dapat dihitung dengan persamaan 11 dan 12:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (11)$$

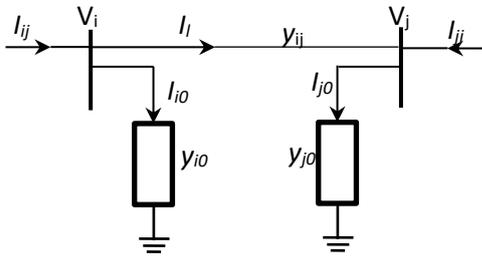
atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (12)$$

Dimana y merupakan admitansi saluran, V merupakan magnitud tegangan, P merupakan daya aktif, Q merupakan daya reaktif dan I merupakan arus listrik yang mengalir pada saluran ke- i .

Berdasarkan persamaan 9 – 12, formulasi matematis dari masalah aliran daya menghasilkan sistem dengan persamaan aljabar nonlinear yang harus diselesaikan dengan teknik iterasi. Setelah tegangan bus didapat dari solusi iteratif, langkah selanjutnya adalah menghitung arus

yang melewati saluran dan rugi-rugi yang muncul pada jaringan,
Gambar 2 memperlihatkan saluran yang terhubung dengan dua bus-i dan j.



Gambar 2. Model saluran transmisi untuk menghitung arus saluran

Arus saluran I_{ij} diukur pada bus i dan didefinisikan positif dengan arah i ke j sesuai persamaan 13:

$$I_{ij} = I_l + I_{io} + y_{ij} (V_i - V_j) + y_{io} V_i \quad (13)$$

Sama seperti (16), arus saluran I_{ji} diukur pada bus j dan didefinisikan positif dengan arah j ke i sesuai persamaan 14:

$$I_{ji} = -I_l + I_{jo} + y_{ij} (V_j - V_i) + y_{jo} V_j \quad (14)$$

Selanjutnya, daya kompleks S_{ij} dari bus i ke j dan S_{ji} dari bus j ke i adalah sesuai persamaan 15 atau 16:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (15)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (16)$$

Rugi-rugi daya dalam saluran i - j adalah penjumlahan aljabar dari aliran daya yang didapat dari (15) dan (16) yang menghasilkan persamaan 17:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (17)$$

2.3. Flower Pollination Algorithm (FPA)

FPA adalah algoritma meta-heuristik yang terinspirasi oleh fenomena alam yang terkait dengan penyerbukan bunga. Proses polinasi, hubungan spesifik, dan sifat polinator dapat diidealkan menjadi 4 aturan yaitu[9]:

1. Polinasi silang dan biotik dianggap sebagai proses polinasi global dengan polinator pembawa serbuk sari melakukan gerak *levy*.
2. Polinasi sendiri dan abiotik dianggap sebagai polinasi lokal.
3. Hubungan spesifik bunga dengan polinator dianggap sebagai kemungkinan reproduksi, proporsional terhadap kemiripan dua bunga.
4. Polinasi lokal dan polinasi global dikendalikan dengan kemungkinan pergantian, karena pendekatan fisik dan faktor lain seperti angin, polinasi lokal dapat memiliki pecahan yang signifikan (p) pada keseluruhan aktivitas polinasi.

Dua langkah kunci pada algoritma ini yaitu polinasi global dan polinasi lokal. Pada langkah polinasi global, serbuk sari dibawa oleh polinator dan dapat berpindah dengan jarak yang jauh. Hal ini memastikan polinasi dan reproduksi yang paling optimal (nilai *fitness* terbaik) dan nilai *fitness* tersebut direpresentasikan sebagai g^* . Aturan pertama sekaligus hubungan spesifik bunga dapat direpresentasikan secara matematis oleh persamaan 18 berikut,

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*) \quad (18)$$

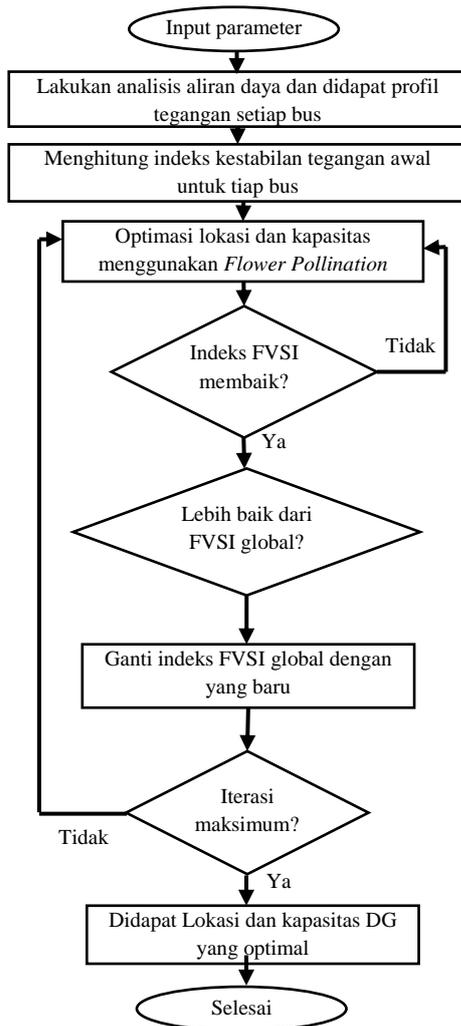
x_i^{t+1} adalah serbuk sari i atau vektor solusi x pada iterasi ke- t dan g^* adalah solusi terbaik terbaru dari semua solusi pada generasi atau iterasi terbaru. Parameter L adalah kekuatan polinasi, yang secara esensial adalah ukuran langkah. Karena serangga sebagai polinator mungkin bergerak pada jarak yang jauh dengan berbagai ukuran langkah, gerak *levy* digunakan untuk merepresentasikan karakteristik ini. Persamaan $L > 0$ diambil dari distribusi *levy*.

Pada polinasi lokal atau aturan kedua, hubungan spesifik bunga direpresentasikan oleh persamaan 19 berikut.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (19)$$

x_j^t dan x_k^t adalah serbuk sari dari bunga yang lain pada jenis yang sama. Secara matematis, jika x_j^t dan x_k^t datang dari jenis yang sama atau dipilih dari populasi yang sama, akan menjadi langkah acak lokal jika nilai ϵ merupakan distribusi seragam dari 0 hingga 1. Langkah-langkah optimisasi peningkatan voltage stability menggunakan FPA dideskripsikan oleh Gambar 3 dan berikut adalah detail penjelasannya:

- Langkah-1: Inisialisasi parameter data bus, data saluran, dan data beban. Tetapkan batas atas dan bawah dari setiap variabel.
- Langkah-2: Membangkitkan populasi awal secara acak.
- Langkah-3: Menjalankan analisis aliran daya dengan metode Newton-Raphson untuk setiap solusi.
- Langkah-4: Menghitung indeks kestabilan tegangan FVSI pada saluran menggunakan (20).
- Langkah-5: Hasil aliran daya dievaluasi dengan fungsi penalti sesuai dengan (7).
- Langkah-6: Simpan solusi terbaik dari pembangkitan populasi awal.
- Langkah-7: Mulai iterasi dengan metode FPA. Jika *probability switch* < nilai acak maka melakukan penyerbukan Global. Jika tidak, lakukan penyerbukan lokal.
- Langkah-8: Hitung nilai fungsi tujuan dari setiap solusi baik melalui penyerbukan lokal atau global.
- Langkah-9: Evaluasi fungsi objektif menggunakan fungsi penalti sesuai dengan (8).
- Langkah-10: Ulangi hingga jumlah iterasi maksimum, simpan solusi terbaik.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

2.4. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan (*Voltage Stability*) didefinisikan oleh IEEE *power system engineering committee* sebagai kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan tegangan sehingga, saat penerimaan beban dinaikkan, daya beban akan meningkat, sehingga daya dan tegangan dapat dikontrol [4]. Sedangkan Gugus Tugas Gabungan IEEE / CIGRE memberikan definisi lain untuk stabilitas tegangan yaitu kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang stabil di semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi operasi awal tertentu [3].

Keseimbangan antara permintaan dan suplai beban memainkan peran penting dalam stabilitas tegangan. Setelah stabilitas tegangan sistem rusak, tegangan node sistem akan naik atau turun, sehingga saluran transmisi dapat mengalami *tripping* yang berurutan, generator jatuh dari langkah, dan pemadaman *cascading* akan terjadi, yang mengakibatkan hilangnya daya sejumlah besar beban dan,

akhirnya, tegangan akan runtuh. Dengan kata lain, runtuhnya tegangan mengacu pada situasi ketika tegangan beban sistem jatuh di bawah nilai batas yang diijinkan karena ketidakstabilan tegangan [12].

2.5. Fast Voltage Stability Index (FVSI)

Indeks ini, yang dikemukakan oleh Musirin (2002), yang didasarkan pada konsep aliran daya melalui satu jalur [13]. Indeks ini dikembangkan berdasarkan pengukuran tegangan dan daya reaktif. FVSI merupakan indeks saluran yang diturunkan dari persamaan umum arus yang mengalir pada saluran antara dua bus, berlabel 's' dan 'r'. Ekspresi matematisnya dinyatakan pada persamaan 20 berikut.

$$FVSI = \frac{4 Z^2 Q_r}{V_s^2 X} \leq 1 \quad (20)$$

Dimana Z adalah impedansi saluran, X adalah reaktansi saluran, Q_r adalah aliran daya reaktif ke ujung penerima dan V_s adalah tegangan ujung pengirim. Jalur yang nilai indeks stabilitasnya paling dekat dengan 1 akan menjadi jalur paling kritis yang terhubung ke bus dan dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem secara keseluruhan. FVSI yang dievaluasi juga membantu menentukan bus terlemah dalam sistem. Indeks ini masih digunakan di beberapa penelitian terakhir karena proses perhitungan yang cepat dan dapat memprediksi suatu saluran yang akan mengalami kolapse dari sisi tegangan nya [14][15][16].

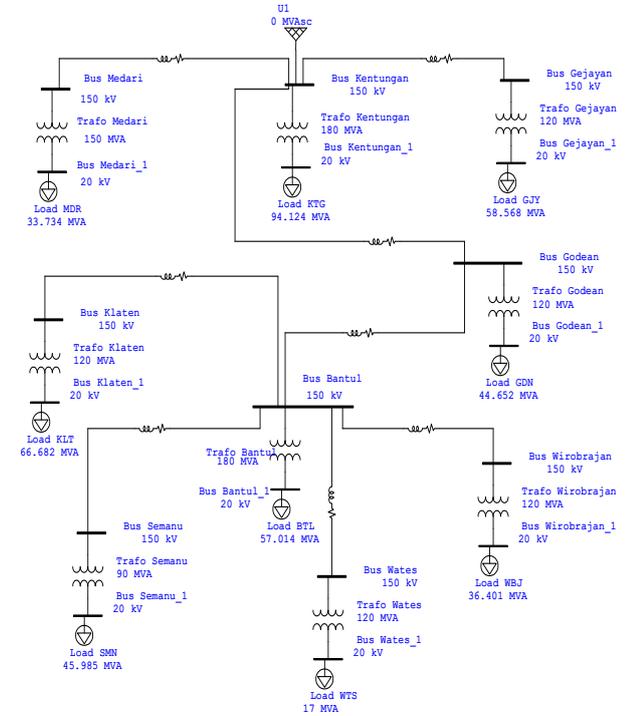
2.6. Sistem Kelistrikan Area Yogyakarta

Sistem kelistrikan yang digunakan pada penelitian ini yaitu sistem kelistrikan 150kV area Yogyakarta yang terdiri dari 9 bus (Gardu Induk) dan 8 saluran. Gardu induk terdiri dari gardu induk Kentungan (bus 1), gardu induk Medari (bus 2), gardu induk Gejayan (bus 3), gardu induk Godean (bus 4), gardu induk Bantul (bus 5), gardu induk Klaten (bus 6), gardu induk Wates (bus 7), gardu induk Semanu (bus 8) dan gardu induk Wirobrajan (bus 9). Sistem ini tidak terdapat pembangkit listrik, namun demikian terdapat *swing bus* yang terletak pada Gardu Induk Kentungan. Diagram garis tunggal sistem kelistrikan dapat dilihat pada Gambar 4.

Data lapangan didapatkan dari badan usaha pengelola sistem tenaga listrik 150kV Jawa bagian Tengah yaitu PT PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah Unit Pelaksana Transmisi Salatiga ULTG Yogyakarta. Data yang telah dikumpulkan akan diolah dan dianalisis untuk pemodelan sistem tenaga listrik 150 kV di Wilayah D.I.Yogyakarta.

Beban pada tiap bus sistem tenaga listrik jaringan 150 kV di Wilayah D.I. Yogyakarta pada tiap harinya berubah secara fluktuatif namun perubahannya tidak begitu signifikan. Perubahan beban yang signifikan terjadi pada tiap jamnya dalam satu hari. Pada penelitian ini penulis

menggunakan data beban puncak pada tanggal 2 Januari 2020 pukul 19.00(WIB) dimana beban puncak terbesar yang pernah terjadi di jaringan sistem tenaga listrik di wilayah D.I.Yogyakarta selama periode pengamatan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 4. Diagram Garis Tunggal Sistem Kelistrikan Yogyakarta

Data saluran disajikan dalam satuan (p.u) dengan basis 100 MVA. Bus tegangan dalam sistem memiliki batas bawah 0,90 pu dan batas atas 1,05 p.u.[17].

Parameter dari FPA yang digunakan dalam penelitian ini adalah ukuran populasi 20, dimensi 4, *probability switch* 0,8, dan jumlah maksimum generasi total 300.

Jumlah lokasi DG yaitu sebanyak 2 tempat dengan kapasitas maksimal masing- masing 50 MVAR.

Tabel 1. Data beban puncak

No	Nama Bus	Beban	
		MW	MVAr
1	Kentungan	93	14.5
2	Medari	-33	-7
3	Gejayan	55.4	19
4	Godean	43.4	10.5
5	Bantul	-56.2	-9.6
6	Klaten	66.2	8
7	Wates	-17	0
8	Semanu	-46.6	11.2
9	Wirobrajan	35	10

Jaringan SUTT menghubungkan tiap bus yang ada pada sistem tenaga listrik. Tabel berikut akan memperlihatkan

daftar SUTT yang menghubungkan bus yang ada di jaringan 150 kV di wilayah DIY. Yang ditunjukkan pada Tabel sudah dikalikan dengan Jarak (km) yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Saluran

No	Saluran	Jarak (km)	R (Ω)	X (Ω)
1	Kentungan - Medari	10.663	1.780721	2.8662144
2	Kentungan - Gejayan	5.951	0.44871	1.452044
3	Kentungan - Godean	7.07	0.48076	1.688316
4	Godean - Bantul	13.211	0.099611	3.223484
5	Bantul - Klaten	34	5.678	9.1392
6	Bantul - Wates	31.720	5.29724	8.526336
7	Bantul - Semanu	39.0431	6.520198	10.49478
8	Bantul - Wirobrajan	6.40	1.0688	1.72032

Sebelum dapat melakukan simulasi, terlebih dahulu harus dilakukan pemodelan sistem tenaga listrik sesuai data-data yang didapat di lapangan dan aturan operasional sistem tenaga listrik 150 kV. Sistem Wilayah D.I.Yogyakarta terdiri dari 9 Bus dan 8 saluran yang terhubung interkoneksi akan dimodelkan dalam program bantu Matpower 6.0. Basis- Basis yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebagai berikut:

- Basis daya : 100 MVA
- Basis tegangan : 150 kV
- Basis Impedansi : $Z_{base} = \frac{(150^2)}{100} = 225 \Omega$

Basis-basis ini digunakan dalam mengubah parameter-parameter data lapangan menjadi dalam bentuk satuan per unit (p.u). Nilai satuan per unit didapat dengan membagi nilai dengan bilangan basis nya. Untuk impedansi per unit maka nilai resistansi (R) dan reaktansi (X) yang terdapat pada

Tabel 2 dibagi dengan Z_{base} sebesar 225Ω sehingga menjadi seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Berikut perhitungan untuk mengubah nilai impedansi saluran ke bentuk per unit.

$$Z_{base} = \frac{Tegangan Dasar^2}{MVA Dasar}$$

$$Z_{base} = \frac{150^2}{100}$$

$$Z_{base} = 225 \Omega$$

$$Z_{p.u} = \frac{Z_{sebenarnya}}{Z_{base}}$$

$$Z_{p.u} = \frac{1,780721}{225}$$

$$R (p.u) = 0,00791431556 \Omega$$

$$Z_{p.u} = \frac{2,8662144}{225}$$

X (p.u) = 0, 0127387307 Ω

Tabel 3. Nilai Impedansi Saluran per unit (p.u)

No	Saluran	R (p.u)	X (p.u)
1	Kentungan - Medari	0.00791431556	0.0127387307
2	Kentungan - Gejayan	0.00199424444	0.00645352889
3	Kentungan - Godean	0.00213671111	0.00750362667
4	Godean - Bantul	0.000442715289	0.0143265956
5	Bantul - Klaten	0.0252355556	0.0406186667
6	Bantul - Wates	0.0235432889	0.0378948267
7	Bantul - Semanu	0.0289786564	0.0466434902
8	Bantul - Wirobrajan	0.00475022222	0.00764586667

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 4. Nilai FVSI Sebelum Optimasi

No	Saluran	FVSI
1	Kentungan - Medari	0
2	Kentungan - Gejayan	0.00567
3	Kentungan - Godean	0.01021
4	Godean - Bantul	0.01105
5	Bantul - Klaten	0.01253
6	Bantul - Wates	9.28644 e-12
7	Bantul - Semanu	0.03083
8	Bantul - Wirobrajan	0.00451
	Rata-rata	0.0094
	Standar Deviasi	0.0099

Tabel 5. Statistik FVSI pada Beberapa Percobaan

Percobaan Ke-	Rata-rata	Standar Deviasi
1	0.005898	0.006594
2	0.005883	0.006606
3	0.005926	0.006577
4	0.005884	0.006605
5	0.006031	0.006495
6	0.005954	0.006552
7	0.005887	0.006603
8	0.005922	0.006575
9	0.005874	0.006613
10	0.005880	0.006608

Tabel 6. Hasil FVSI Setelah Pemasangan DG

Uji ke-	DG1		DG2		FVSI							
	Bus	Kapasitas (MVar)	Bus	Kapasitas (MVar)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	9.615	3	15.411	0	0.001406	0.008146	0.007390	0.020225	6.93E-12	0.005513	0.004500
2	8	9.364	3	19.065	0	0.001257	0.008149	0.007395	0.020215	6.93E-12	0.005545	0.004500
3	8	9.375	3	24.902	0	0.001920	0.008121	0.007345	0.020319	6.90E-12	0.005201	0.004500
4	8	9.218	3	27.897	0	0.001268	0.008149	0.007395	0.020216	6.93E-12	0.005544	0.004500
5	8	9.609	3	22.692	0	0.002209	0.008170	0.007431	0.020139	6.97E-12	0.005798	0.004500
6	8	9.415	3	25.465	0	0.001402	0.008186	0.007461	0.020077	6.96E-12	0.006002	0.004500
7	8	9.931	3	24.608	0	0.001330	0.008145	0.007388	0.020229	6.93E-12	0.005501	0.004500
8	8	9.235	3	25.494	0	0.001453	0.008159	0.007412	0.020178	6.94E-12	0.005669	0.004500
9	8	9.524	3	24.909	0	0.001286	0.008141	0.007380	0.020247	6.92E-12	0.005442	0.004500
10	8	9.241	3	26.896	0	0.001253	0.008148	0.007392	0.020220	6.93E-12	0.005530	0.004500

Sebelum menjalankan optimasi, maka perlu dilakukan perhitungan FVSI pada kondisi eksisting saat belum terpasang DG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil selama 10 kali percobaan ditunjukkan pada Tabel 5. Dari tabel tersebut diketahui bahwa lokasi penempatan DG konsisten berada pada bus 8 (GI Semanu) dan bus 3 (GI Gejayan) dengan kapasitas yang berbeda-beda. Oleh karena itu perlu dilakukan penentuan nilai terbaik dari 10 kali percobaan tersebut. Pemilihan hasil terbaik didasarkan dari hasil FVSI di semua bus dengan nilai rata-rata terkecil. Hasil lebih lengkap ditunjukkan pada Tabel 5.

Hasil FVSI dari beberapa kali percobaan kemudian dilakukan uji statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata dan standar deviasi yang ditunjukkan pada Tabel 5.

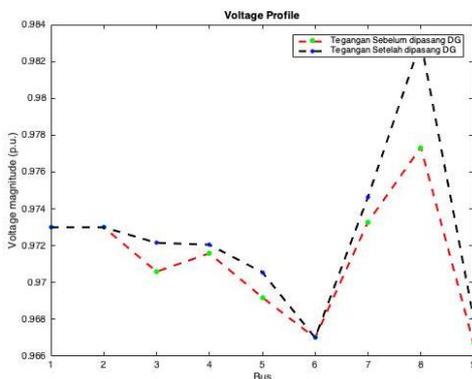
Dari Tabel 5 pada percobaan ke-9 mendapatkan nilai rata-rata FVSI yang terendah, ini menunjukkan tingkat kestabilan yang terbaik dibandingkan percobaan lainnya. Oleh karena itu hasil pada percobaan ke-9 akan dibandingkan dengan nilai FVSI sebelum pemasangan DG sesuai dengan Tabel 4. Hasil percobaan ke-9 menjadi hasil yang dipilih dengan penempatan DG yang optimal terletak pada Gardu Induk Gejayan (bus 3) sebesar 24,9095 MVAR dan Gardu Induk Semanu (bus 8) sebesar 9,52361 MVAR.

Setelah pemasangan DG sesuai dengan percobaan ke-9, kestabilan tegangan meningkat di hamper semua bus yang ada yang ditandai dengan nilai FVSI yang berkurang rata-rata sebesar 25,15% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

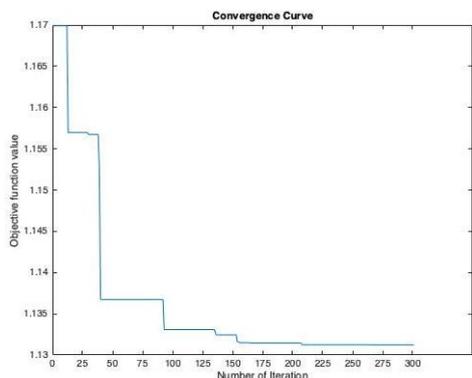
Tabel 7. Perbandingan Indeks FVSI Sebelum dan Sesudah Pemasangan DG

No	Saluran	FVSI			
		Sebelum	Sesudah	Selisih	(%)
1	Kentungan-Medari	0	0	0	0
2	Kentungan-Gejayan	0.00567	0.00129	-0.00438	-77.32
3	Kentungan-Godean	0.01021	0.00814	-0.00207	-20.27
4	Godean-Bantul	0.01105	0.00738	-0.00367	-33.22
5	Bantul-Klaten	0.01253	0.02025	0.00772	61.58
6	Bantul-Wates	9.286E-12	6.926E-12	-2.360E-12	-25.41
7	Bantul-Semanu	0.03083	0.00544	-0.02539	-82.35
8	Bantul-Wirobrajan	0.00451	0.00450	-1.011E-05	-0.22
	Rata-rata	0.0094	0.0059		-22.15
	Standar Deviasi	0.0099	0.0066		

Nilai magnitud tegangan setelah dilakukan optimasi pemasangan pembangkitan tersebar mengalami peningkatan, namun masih berada dalam ambang batas yang diijinkan yaitu antara -10% sampai +5% sesuai dengan aturan jaringan yang berlaku[17]. Nilai magnitud tegangan terendah setelah optimasi sebesar 0,967 p.u terletak pada bus 6 (gardu induk Klaten) dan nilai tegangan tertinggi sebesar 0,983 p.u yang terletak pada bus 8 (gardu induk Semanu). Grafik magnitud tegangan jaringan sebelum dan sesudah optimasi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Profil Tegangan Sistem



Gambar 6. Kurva Konvergensi

Konvergensi pada suatu proses optimisasi merupakan hal yang penting untuk diperhatikan, hal ini untuk

menunjukkan sejauh mana nilai dari fungsi tujuan tersebut merupakan nilai yang paling minimal atau maksimal yang sudah relatif konstan dan tidak ada lagi perubahan yang signifikan. Gambar 6 menunjukkan grafik konvergensi dari nilai fungsi obyektif dengan metode FPA pada percobaan ke-9 yang merupakan hasil terbaik dari 10 kali percobaan.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini metode FPA diusulkan untuk menyelesaikan permasalahan peningkatan kestabilan tegangan di sistem kelistrikan 150kV Yogyakarta dengan pemasangan distributed generation (DG). Penelitian dilakukan dengan mencari lokasi dan kapasitas yang optimal untuk mendapatkan nilai FVSI yang minimal. Penempatan DG yang optimal terletak pada Gardu Induk Gejayan (bus 3) sebesar 24,9095 MVAR dan Gardu Induk Semanu (bus 8) sebesar 9,52361 MVAR. Dari instalasi DG, kestabilan tegangan sistem meningkat, hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai FVSI pada sebagian besar saluran. Sistem mengalami peningkatan stabilitas tegangan dengan penurunan rata-rata FVSI sebesar 22,15%.

Referensi

- [1]. M. Vatani, D. S. Alkaran, M. J. Sanjari, and G. B. Gharehpetian, "Multiple distributed generation units allocation in distribution network for loss reduction based on a combination of analytical and genetic algorithm methods," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 66–72, 2016.
- [2]. K. Mahmoud, N. Yorino, and A. Ahmed, "Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 960–969, 2016.
- [3]. H. Musa, "A Review of Distributed Generation Resource Types and Their Mathematical Models for Power Flow Analysis," *Int. J. Sci. Technol. Soc.*, vol. 3, no. 4, p. 204, 2015.
- [4]. B. Zhang, P. Dehghanian, and M. Kezunovic, "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 535–545, 2019.
- [5]. A. Öner and A. Abur, "Voltage stability based placement of distributed generation against extreme events," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, no. April, p. 106713, 2020.
- [6]. C. Shuai, Y. Deyou, G. Weichun, L. Chuang, C. Guowei, and K. Lei, "Global sensitivity analysis of voltage stability in the power system with correlated renewable energy," *Electr. Power Syst. Res.*, no. October, p. 106916, 2020.
- [7]. A. Schinke and I. Erlich, "Enhanced Voltage and Frequency Stability for Power Systems with High Penetration of Distributed Photovoltaic Generation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 31–36, 2018.
- [8]. A. Bedawy and N. Yorino, "Reactive Power Control of DGs for Distribution Network Voltage Regulation Using Multi-Agent System," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 528–533, 2018.

- [9]. X.-S. Yang, "Flower Pollination Algorithm for Global Optimization," *Unconv. Comput. Nat. Comput.* 2012, *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 7445, pp. 240–249, 2012.
- [10]. PT. Perusahaan Listrik Negara, "Rencana usaha penyediaan tenaga listrik," *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga List.*, pp. 2019–2028, 2019.
- [11]. M. A. Abido, "Multiobjective optimal VAR dispatch using strength Pareto evolutionary algorithm," *Evol. Comput.* 2006. CEC 2006. IEEE Congr., pp. 730–736, 2006.
- [12]. P. Kundur, J. Paserba, and V. Ajjarapu, "Definition and Classification of Power System Stability," *2004 IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [13]. I. Musirin and T. K. Abdul Rahman, "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system," *2002 Student Conf. Res. Dev. Glob. Res. Dev. Electr. Electron. Eng. SCORED 2002 - Proc.*, pp. 265–268, 2002.
- [14]. I. A. Samuel, J. Katende, C. O. A. Awosope, and A. A. Awelewa, "Prediction of voltage collapse in electrical power system networks using a new voltage stability index," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 190–199, 2017.
- [15]. I. A. Samuel, J. Katende, C. O. A. Awosope, A. A. Awelewa, A. I. Adekitan, and F. A. Agbetuyi, "Power system voltage collapse prediction using a new line stability index (NLSI-1): A case study of the 330-kV Nigerian National Grid," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 6, pp. 5125–5133, 2019.
- [16]. M. Mathew, S. B. D, V. P.S., and N. M.S., "Effect of TCSC on Line Voltage Stability Indices under Single Line Outage Condition," *Ijireeice*, vol. 3, no. 8, pp. 101–105, 2015.
- [17]. R. Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya mineral Nomor 04 tahun 2009 Tentang Aturan Distribusi Tenaga Listrik," p. 9, 2009.