

Alokasi Optimal DG Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Algoritme *Multi-Verse Optimizer*

(*Optimal Allocation of DG Renewable Energy Sources Using Multi-Verse Optimizer Algorithm*)

Firdaus^{1,2}, Ontoseno Penangsang¹, Rony Seto Wibowo¹, Umar¹

Abstract—In the current situation, minimizing power loss in both distribution and transmission networks is one of the research challenges. High power loss occurs when the load connected to the distribution network is distant from the power plant. The optimal allocation for Distributed Generation (DG) renewable energy sources is one way to minimize power loss and to improve the voltage profile distribution system. Inaccurate placement causes increased power losses, lowers the voltage profile, and can adversely affect system performance. The Multi-Verse Optimizer (MVO) method is used to place DG renewable energy sources in the right location. The simulation results on the IEEE 33 Bus system show that the use of the MVO algorithm method for the addition of two renewable energy DGs obtained locations on buses 18 and 33 with the type DG PV. However, the addition of two DGs is carried out by considering the intermittency, then the optimal DG location is obtained by the two DGs being on bus 18 with the DG WT type. The optimal allocation of DG is able to minimize the active power loss of 11.8 kV and reactive power of 8.2 kVAR and raise the voltage profile above 0.95 pu on the bus undervoltage.

Intisari—Dalam situasi saat ini, meminimalkan kehilangan daya pada jaringan distribusi maupun transmisi merupakan salah satu tantangan penelitian. Kehilangan daya yang tinggi terjadi ketika beban yang terhubung pada jaringan distribusi jauh dari pembangkit listrik. Alokasi yang optimal untuk *Distributed Generation* (DG) sumber energi terbarukan adalah salah satu cara untuk meminimalkan kehilangan daya dan memperbaiki profil tegangan sistem distribusi. Penempatan yang tidak akurat menyebabkan peningkatan kehilangan daya, menurunkan profil tegangan, dan dapat memengaruhi kinerja sistem. Metode *Multi-Verse Optimizer* (MVO) digunakan untuk menempatkan DG sumber energi terbarukan di lokasi yang tepat. Hasil simulasi pada sistem 33 bus IEEE menunjukkan bahwa dengan penggunaan metode algoritme MVO untuk penambahan dua buah DG energi terbarukan diperoleh lokasi pada bus 18 dan 33 dengan tipe DG PV. Namun, apabila penambahan dua buah DG dilakukan dengan mempertimbangkan sifat intermiten, lokasi DG yang optimal dengan diperoleh kedua DG berada pada bus 18 dengan tipe DG *Wind Turbine*. Alokasi DG sumber energi terbarukan yang optimal mampu meminimalkan rugi daya aktif

11,8 kV dan daya reaktif 8,2 kVAR serta menaikkan profil tegangan di atas 0,95 pu pada bus undervoltage.

Kata Kunci—*Multi-Verse Optimizer*, DG Sumber Energi Terbarukan.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik bertujuan untuk menyalurkan daya di setiap lokasi jaringan sistem tenaga secara ekonomis dan andal. Pembangkit energi listrik menggunakan sumber energi seperti batu bara, hidro, dan nuklir. Pembangkit energi listrik berskala besar dan terpusat menyalurkan energi listrik secara luas ke berbagai jenis konsumen yang terhubung melalui jaringan transmisi dan distribusi yang sangat panjang. Hal ini menyebabkan rugi-rugi daya meningkat dan profil tegangan menurun. Kemudian, muncul sumber energi terbarukan sebagai salah satu solusi untuk menyelesaikan sebagian besar dari tantangan yang akan datang. Sumber energi terbarukan dapat dijadikan sebagai pembangkitan dengan jangkauan kecil atau pembangkitan terdesentralisasi yang tidak direncanakan secara terpusat. Sumber energi terbarukan digunakan di dekat sisi beban. Sumber energi terbarukan menggunakan sumber energi seperti sistem *photovoltaic* (PV) surya, sistem pembangkit tenaga angin, *fuel cell*, turbin hidro kecil, dan DG berbasis biomassa.

Banyak manfaat yang dapat diambil dengan integrasi DG sumber energi terbarukan ke dalam jaringan distribusi, khususnya dalam hal kualitas daya dan pertimbangan ekonomi. DG sumber energi terbarukan mengalami masalah ketidakpastian yang serius dibandingkan dengan sumber daya berbasis bahan bakar fosil karena sumber-sumber ini dipengaruhi oleh variasi sistem tenaga dan kondisi cuaca. Diketahui bahwa daya keluaran PV umumnya bervariasi oleh iradiasi [1]–[4], sedangkan daya keluaran turbin angin bervariasi berdasarkan kecepatan angin [5]–[8]. Ketidakpastian dalam DG sumber energi terbarukan menyebabkan beberapa masalah keandalan dalam sistem tenaga [9]. Selain itu, beban juga berubah setiap jam dan setiap hari sesuai dengan variasi aktivitas konsumen. Oleh karena itu, ketidakpastian dalam sistem tenaga harus menjadi pertimbangan dalam perencanaan sistem tenaga dengan penetrasi DG sumber energi terbarukan. Beberapa penelitian telah membahas alokasi optimal DG [10]–[16]. Misalnya, alokasi DG menggunakan algoritme JAYA yang dibandingkan dengan varian *Particle Swarm Optimization* (PSO), antara lain RPSO, LPSO, dan PSO-SR [15]. Dilihat dari karakteristik konvergensi, algoritme JAYA konvergen lebih cepat daripada algoritme lainnya. Algoritme JAYA konvergen

¹Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111 Indonesia (Fax: (031) 5931237; e-mail: dauselektrounm@gmail.com)

²Departemen Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Negeri Makassar, Kampus UNM Parangtambung, Makassar 90223 Indonesia (Fax (0411) 861377; e-mail: dauselektro@unm.ac.id)

pada detik 115,02, RPSO pada detik 124,36, LPSO pada detik 124,33 dan PSO-SR pada detik 115,78. Ukuran optimal DG adalah 1.300,3 kW dan lokasi optimal pada bus 19 untuk sistem 33 bus IEEE.

Pada makalah ini, dibahas alokasi optimal DG sumber energi terbarukan. Sumber energi DG sumber energi terbarukan yang digunakan adalah sistem PV surya dan sistem pembangkit tenaga angin. Makalah ini menggunakan *Genetic Algorithms* (GA) untuk menentukan alokasi optimal DG sumber energi terbarukan [17]. Pada makalah ini, fungsi tujuan adalah alokasi optimal dan tipe DG sumber energi terbarukan untuk memperoleh rugi daya minimal dan menaikkan profil tegangan dengan mempertimbangkan sifat intermiten energi terbarukan menggunakan algoritme *Multi-Verse Optimizer* (MVO).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melihat perbandingan minimisasi deviasi tegangan menggunakan algoritme MVO. Hasilnya adalah dengan menggunakan MVO, deviasi tegangan yang diperoleh sebesar 0,1056, menggunakan *Flower Pollination Algorithm* diperoleh deviasi tegangan 0,1845, dan menggunakan PSO diperoleh deviasi tegangan sebesar 0,1506. Keunggulan MVO adalah kinerja yang bagus dalam hal optimasi dan konvergensi yang cepat [18].

II. ALGORITME MVO

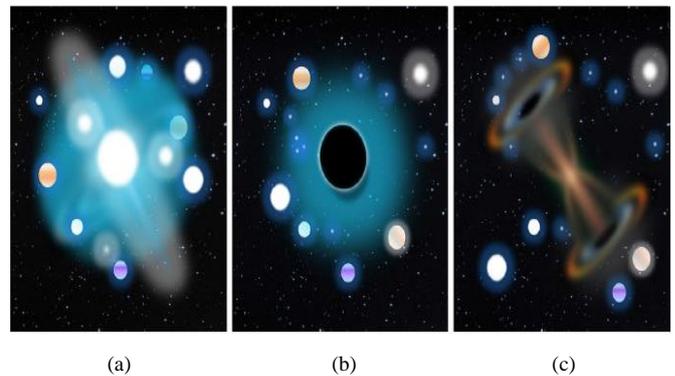
MVO pertama kali digunakan oleh Syedali Mirjalili pada tahun 2015. MVO didasarkan pada teori *multi-verse* dan teori *big bang*. Teori *big bang* membahas bahwa alam semesta dimulai dengan ledakan besar. Diyakini dalam teori ini bahwa ada lebih dari satu *big bang* dan setiap ledakan besar menyebabkan lahirnya alam semesta. Istilah *multi-verse* berdiri berlawanan dengan alam semesta, yang mengacu pada keberadaan alam semesta lain selain alam semesta tempat tinggal manusia [19].

Proses pencarian dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap eksplorasi dan eksploitasi [19]. MVO terdiri atas tiga konsep utama yaitu:

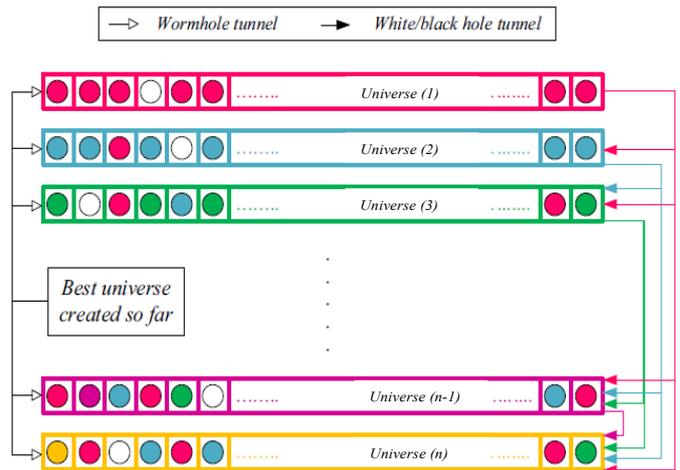
1. lubang putih (*white hole*),
2. lubang hitam (*black hole*), dan
3. lubang terowongan (*worm hole*).

Lubang putih belum terlihat di alam semesta. Menurut ahli fisika, *big bang* dianggap sebagai lubang putih, yang mungkin menjadi sumber utama alam semesta. Sementara itu, lubang hitam terlihat di alam semesta. Lubang hitam menarik benda-benda alam semesta ke dalamnya. *Worm hole* adalah terowongan antara dua alam semesta. Benda-benda berjalan di antara alam semesta melalui terowongan ini. Setiap alam semesta mengandung tingkat *inflasi*. Dengan tingkat *inflasi*, nilai *fitness* dihitung. Model konseptual ini merupakan tiga komponen kunci dari teori *multi-verse*, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1.

Algoritme berbasis populasi membagi proses pencarian menjadi dua fase, yaitu eksplorasi dan eksploitasi. Digunakan konsep lubang putih dan lubang hitam untuk mengeksplorasi ruang pencarian oleh MVO. Sebaliknya, lubang terowongan membantu MVO dalam mengeksploitasi ruang pencarian. Diasumsikan bahwa setiap solusi adalah analogi alam semesta dan setiap variabel adalah objek di alam semesta. Selain itu,



Gbr. 1 Gambar ilustrasi, (a) lubang putih, (b) lubang hitam, (c) terowongan.



Gbr. 2 Model konsep algoritme MVO ($I(U1) > I(U2) > \dots > I(Un-1) > I(Un)$).

ditetapkan masing-masing solusi tingkat inflasi yang sesuai, yang sebanding dengan nilai fungsi *fitness* dari solusinya. Istilah *time instead* sebagai iterasi dalam tulisan juga memakai istilah umum dalam teori *multi-verse* dan kosmologi.

Dalam optimasi, aturan yang diterapkan alam semesta MVO adalah sebagai berikut.

1. Tingkat inflasi yang lebih tinggi, probabilitas yang lebih tinggi adalah yang dimiliki lubang putih.
2. Tingkat inflasi yang lebih tinggi, probabilitas yang lebih rendah adalah yang dimiliki lubang hitam.
3. Alam semesta dengan tingkat inflasi yang tinggi cenderung mengirim benda melalui lubang putih.
4. Alam semesta dengan tingkat inflasi yang rendah cenderung menerima lebih banyak objek melalui lubang hitam.
5. Objek di semua alam semesta mungkin menghadapi gerakan acak menuju alam semesta terbaik melalui lubang terowongan pada tingkat inflasi.

Model konseptual algoritme MVO ditunjukkan pada Gbr. 2. Model matematis lubang putih dan hitam serta terowongan pertukaran benda alam semesta menggunakan mekanisme roda rolet. Pada setiap iterasi, alam semesta diurutkan berdasarkan tingkat inflasi dan dipilih salah satu dari alam semesta dengan roda rolet yang memiliki lubang putih. Langkah-langkah yang dilakukan agar langkah ini bisa dimodelkan mengikuti (1).

$$U = \begin{bmatrix} X_1^1 & \dots & X_1^d \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^1 & \dots & X_n^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

dengan d adalah jumlah parameter (variabel) dan n adalah jumlah alam semesta (solusi kandidat).

$$X_i^j = \begin{cases} X_k^j & r1 < NI(Ui) \\ X_i^j & r1 \geq NI(Ui) \end{cases} \quad (2)$$

dengan X_i^j adalah indikasi parameter j dari alam semesta i , U_i menunjukkan alam semesta, $NI(U_i)$ adalah tingkat inflasi yang dinormalisasi dari alam semesta, $r1$ adalah bilangan acak di $[0, 1]$, dan X_k^j menunjukkan parameter j dari alam semesta k yang dipilih oleh mekanisme pemilihan roda rolet.

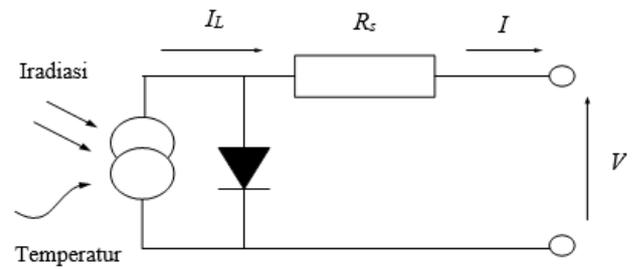
Seperti yang dapat dilihat pada (1), pemilihan dan penentuan lubang putih dilakukan oleh roda rolet, yang didasarkan pada tingkat inflasi yang dinormalisasi. Pada tingkat inflasi yang rendah, probabilitas yang lebih tinggi mengirim objek melalui terowongan lubang putih atau hitam. Dapat diperhatikan bahwa $-NI$ harus diubah menjadi NI untuk memaksimalkan problem. Eksplorasi dapat dilakukan melalui mekanisme sejak alam semesta diminta untuk bertukar objek dan menghadapi perubahan mendadak untuk menjelajahi ruang pencarian.

Dengan mekanisme di atas, alam semesta terus bertukar objek tanpa gangguan. Untuk menjaga keragaman alam semesta dan melakukan eksploitasi, dipertimbangkan bahwa setiap alam semesta memiliki lubang terowongan untuk mengangkut objek melalui ruang secara acak. Gbr. 2 menunjukkan bahwa titik putih mewakili objek yang ditransfer melalui lubang terowongan. Dapat diamati bahwa lubang terowongan secara acak mengubah objek alam semesta tanpa mempertimbangkan tingkat inflasi. Untuk memberikan perubahan lokal untuk masing-masing alam semesta yang memiliki probabilitas tinggi pada peningkatan tingkat inflasi menggunakan lubang terowongan, diasumsikan bahwa lubang terowongan itu selalu terbentuk antara alam semesta dan alam semesta terbaik. Perumusan mekanisme tersebut adalah sebagai berikut.

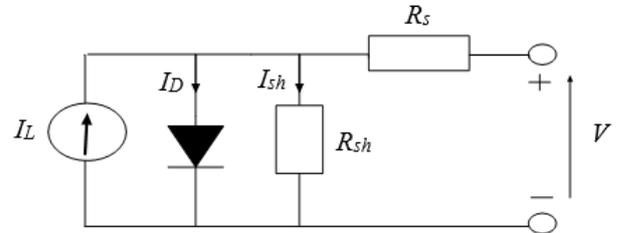
$$X_i^j = \begin{cases} X_j + TDR \cdot x((ub_j - lb_j) \cdot r4 + lb_j) \cdot r3 < 0,5 & r2 < WEP \\ X_j - TDR \cdot x((ub_j - lb_j) \cdot r4 + lb_j) \cdot r3 < 0,5 & r2 < WEP \\ X_i^j & r2 \geq WEP \end{cases} \quad (3)$$

dengan X_j adalah parameter j dari alam semesta terbaik, TDR adalah koefisien, WEP adalah koefisien lain, lb_j menunjukkan batas bawah variabel j , ub_j adalah batas atas variabel j , X_i^j menunjukkan parameter j dari alam semesta, sedangkan $r2$, $r3$, dan $r4$ adalah bilangan acak pada $[0, 1]$.

Dari formulasi matematis terlihat bahwa ada dua koefisien utama, yaitu *Wormhole Existence Probability* (WEP) dan *Travelling Distance Rate* (TDR). Koefisien WEP digunakan untuk menentukan kemungkinan keberadaan *wormhole* di alam semesta. Hal ini diperlukan untuk meningkatkan linearitas selama iterasi agar menekankan eksploitasi sebagai kemajuan proses optimasi. TDR juga merupakan faktor yang menentukan variasi jarak suatu objek yang dapat diteleportasi oleh



Gbr. 3 Rangkaian sederhana PV [20].



Gbr. 4 Rangkaian kompleks PV [21].

wormhole di sekitar alam semesta terbaik. Berbeda dengan WEP, TDR meningkat selama iterasi melakukan eksploitasi lokal yang lebih tepat di sekitar alam semesta terbaik.

III. PEMODELAN SUMBER ENERGI TERBARUKAN

Sumber energi terbarukan yang digunakan adalah model PV dan model turbin angin (*Wind Turbine*, WT).

A. Model Photovoltaic (PV)

PV dimodelkan secara sederhana sebagai sebuah rangkaian yang terdiri atas sumber arus yang terpasang paralel dengan sebuah diode seperti pada Gbr. 3 [20]. Besar arus keluaran suatu PV bergantung pada besar iradiasi sinar matahari yang diterima oleh sel PV dengan karakteristik I-V dari PV ditentukan oleh karakteristik diode.

Berdasarkan perkembangannya, model PV tidak sesederhana seperti pada Gbr. 3, tetapi dalam prakteknya ada beberapa parameter yang ditambahkan sehingga model PV menjadi kompleks seperti pada Gbr. 4 [21]. Parameter-parameter yang ditambahkan tersebut yaitu [21]:

1. arus saturasi diode (I_D) bergantung pada suhu;
2. arus foto (I_L) yang juga bergantung pada suhu;
3. hambatan paralel (R_{sh}) terpasang paralel dengan diode; dan
4. hambatan seri (R_s) yang memberikan bentuk yang jelas antara *maximum power point* dengan tegangan rangkaian terbuka.

Pada Gbr. 4 terdapat perubahan pada rangkaian ekuivalen PV. Persamaan dasar suatu PV adalah sebagai berikut:

$$I = I_L - I_D \left[e^{\frac{q(V + IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (4)$$

dengan:

$$I = \text{ arus keluaran PV (A)}$$

I_L = arus yang terbangkit dari PV (A)
 I_D = arus saturasi pada diode
 q = muatan elektron = $1,6 \times 10^{-19}$ (C)
 K = konstanta Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ (J/K)
 T = temperatur sel (K)
 R_s = resistansi seri PV (Ω)
 R_{sh} = resistansi paralel PV (Ω)
 V = tegangan keluaran PV (V)
 n = faktor kualitas diode yang mempunyai nilai antara 1 dan 5.

Iradiasi matahari untuk jam yang sama pada hari biasa di setiap musim biasanya memiliki fungsi distribusi *bimodal*. Data dibagi menjadi dua kelompok, dengan masing-masing kelompok memiliki fungsi distribusi *unimodal*. Oleh karena itu, untuk menggambarkan fenomena acak dari data iradiasi, PDF beta digunakan untuk masing-masing *unimodal*, seperti yang dijelaskan di bawah ini [22]–[24].

$$f_b(y) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} * y^{(\alpha-1)} \\ * (1 - y)^{(\beta-1)}, \\ 0, \end{cases} \quad (5)$$

untuk $0 \leq y \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$

dengan

y = iradiasi matahari (kW/m^2)
 $f_b(y)$ = fungsi distribusi beta y
 α, β = parameter pada fungsi distribusi beta.

Untuk menghitung parameter fungsi distribusi beta, *mean* (μ) dan standar deviasi (σ) dari variabel acak (y) digunakan sebagai berikut.

$$\beta = (1 - \mu) * \left(\frac{\mu * (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\mu * \beta}{1 - \mu} \quad (7)$$

Daya keluaran modul PV bergantung pada iradiasi matahari dan suhu di sekitar lokasi serta karakteristik modul itu sendiri. Oleh karena itu, PDF beta dihasilkan untuk segmen waktu tertentu dan daya keluaran bagian berbeda dihitung untuk segmen berikut.

$$T_{c_z} = T_A + y_{az} \left(\frac{N_{OT} - 20}{0,8} \right) \quad (8)$$

$$I_z = y_{az} [I_{sc} + K_i(T_c - 25)] \quad (9)$$

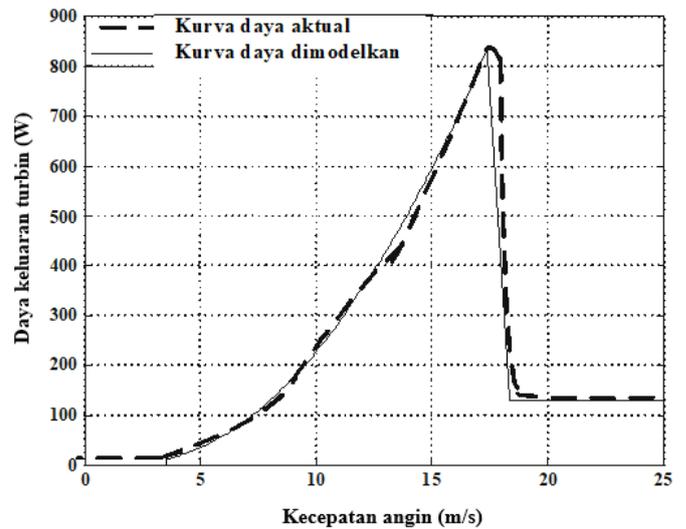
$$V_z = V_{ac} - K_v * T_{c_y} \quad (10)$$

$$P_{y_z}(y_{az}) = N * FF * V_z * I_z \quad (11)$$

$$FF = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{ac} * I_{sc}} \quad (12)$$

dengan

T_{c_z} = suhu sel z dalam ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{c_y} = suhu sel y dalam ($^{\circ}\text{C}$)
 T_A = suhu sekeliling (*ambient*) ($^{\circ}\text{C}$)
 K_v = koefisien suhu tegangan ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$)



Gbr. 5 Kurva daya aktual dan modelnya [25].

K_i = koefisien suhu arus ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$)
 N_{OT} = suhu operasi nominal sel ($^{\circ}\text{C}$)
 FF = faktor pengisian sel.

B. Model Turbin Angin

Dalam makalah ini, pembangkit tenaga angin dianggap sebagai sumber terbarukan tenaga listrik. Metode pemodelan pembangkit tenaga angin dilakukan dengan memperhatikan kecepatan angin.

Fungsi distribusi probabilitas untuk kecepatan angin diekstraksi dari data historis yang diperoleh dari stasiun meteorologi, yaitu secara detail mengadaptasi fungsi distribusi yang diketahui dari kecepatan angin. Fungsi distribusi yang disesuaikan dieksploitasi dalam meramalkan kecepatan angin di masa depan serta dalam perhitungan berikutnya. Fungsi yang berhubungan dengan keluaran daya rata-rata turbin angin dan nilai kecepatan angin dapat ditentukan sesuai dengan karakteristik turbin.

Kurva daya harus diperoleh untuk memodelkan kinerja turbin angin. Kurva daya ditunjukkan pada Gbr. 5. Dari model kurva daya tersebut, daya keluaran turbin angin dapat diperoleh (13).

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq x_t \leq v_{ci} \\ P_r * \frac{(x_t - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq x_t \leq v_r \\ P_r & v_r \leq x_t \leq v_{co} \\ 0 & x_t \geq v_{co} \end{cases} \quad (13)$$

dengan

P_t = daya keluaran turbin angin (W)
 P_r = rating daya (W)
 v_{ci} = kecepatan *cut in* turbin angin (m/s)
 v_r = rating kecepatan angin (m/s)
 v_{co} = kecepatan *cut out* turbin angin (m/s)
 x_t = kecepatan angin aktual (m/s).

Data peramalan iradiasi matahari dan kecepatan angin yang digunakan berdasarkan penelitian sebelumnya disajikan pada Tabel I [26].

TABEL I
PERKIRAAN IRADIASI MATAHARI DAN KECEPATAN ANGIN

Waktu (Jam)	Iradiasi Matahari (W/m ²)	Kecepatan Angin (m/s)	Waktu (Jam)	Iradiasi Matahari (W/m ²)	Kecepatan Angin (m/s)
1	0	8,4	13	558	1,4
2	0	9,9	14	397	0,1
3	0	10,1	15	598	1,8
4	0	9,7	16	404	1,3
5	1	8,9	17	215	2,2
6	58	9,6	18	63	3,8
7	141	10	19	0	3,7
8	195	8,5	20	0	2,0
9	363	5,0	21	0	0,6
10	349	3,5	22	0	0,4
11	388	3,6	23	0	4,0
12	558	1,5	24	0	3,2

IV. FORMULA OPTIMASI

Formula yang tepat dibutuhkan untuk menentukan optimasi DG sumber energi terbarukan. Optimasi dilakukan untuk memperoleh lokasi dan tipe DG sumber energi terbarukan sehingga didapatkan nilai rugi daya minimal dan meningkatkan profil tegangan. Simulasi dilakukan pada sistem 33 bus IEEE. Langkah langkah alokasi optimal DG ditunjukkan melalui diagram alir pada Gbr. 6.

A. Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya pada sistem *microgrid* ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{loss} = \sum P_i - P_{load} \tag{13}$$

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^{N_i} g_k \left[(t_k V_i^2) + V_j^2 - 2t_k V_i V_j \cos(\theta_1 - \theta_2) \right] \tag{14}$$

dengan P_{loss} adalah rugi-rugi daya total, P_i adalah daya pembangkitan, P_{load} adalah daya beban, V_i adalah tegangan pada bus i , V_j adalah tegangan pada bus j , N_i jumlah cabang, g_k adalah konduktansi pada *branch* k , θ_i adalah sudut tegangan pada bus i , dan θ_j adalah sudut tegangan pada bus j .

B. Profil Tegangan

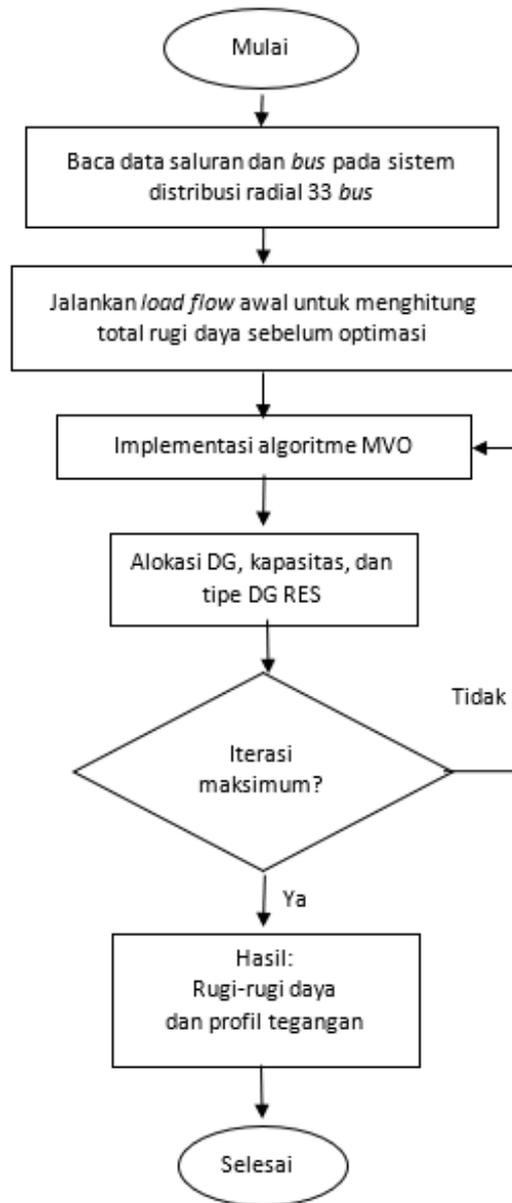
Penempatan DG ke dalam sistem tenaga dimaksudkan untuk memperbaiki profil tegangan pada setiap bus. Tegangan pada setiap bus diharapkan mendekati atau sama dengan 1 pu. Profil tegangan dituliskan sebagai berikut:

$$V_p = |V_{ref} - V| \tag{15}$$

dengan V_p adalah profil tegangan, sedangkan V_{ref} adalah tegangan referensi.

V. HASIL SIMULASI

Pada makalah ini, simulasi dilakukan dengan tiga skenario. Hasil simulasi terdiri atas: 1) hasil simulasi tanpa penambahan DG; 2) hasil simulasi dengan penambahan DG energi terbarukan; dan 3) hasil simulasi penambahan DG energi terbarukan dengan memperhatikan faktor sifat intermiten.



Gbr. 6 Diagram alir alokasi optimal DG menggunakan MVO.

A. Hasil Simulasi tanpa DG

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya yang dilakukan terkait kondisi awal atau sebelum menambahkan DG sumber energi terbarukan, diperoleh total rugi daya nyata pada saluran sebesar 202,2 kW dan total rugi daya reaktif sebesar 134,8 kVAr. Dari data simulasi sebelum penambahan DG sumber energi terbarukan yang ditunjukkan pada Tabel II, dapat diketahui bahwa tegangan pada bus tidak semuanya normal. Tegangan di bus 6 sampai bus 18 dan pada bus 26 sampai bus 33 mengalami *undervoltage*, yaitu tegangan di bawah 0,95 pu.

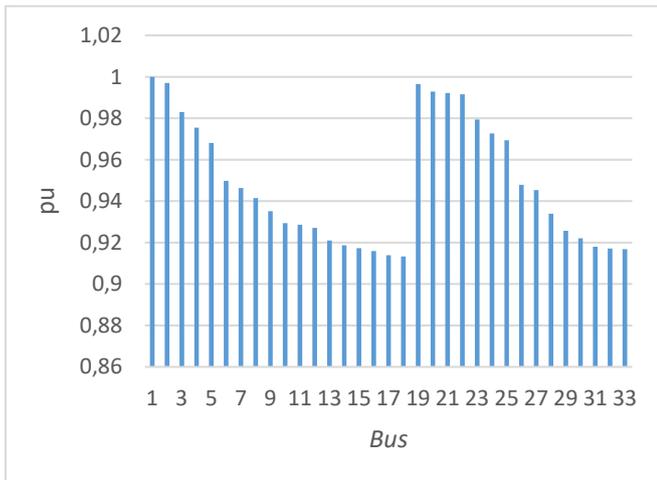
Gbr. 7 menunjukkan grafik profil tegangan pada setiap bus pada simulasi tanpa penambahan DG sumber energi terbarukan (DG RES). Pada gambar tersebut terlihat bahwa tegangan terendah terdapat pada bus 18, yaitu sebesar 0,9133 pu, dan tegangan tertinggi pada bus sumber, yaitu bus 1, sebesar 1 pu.

TABEL II
TEGANGAN BUS SEBELUM PENAMBAHAN DG RES

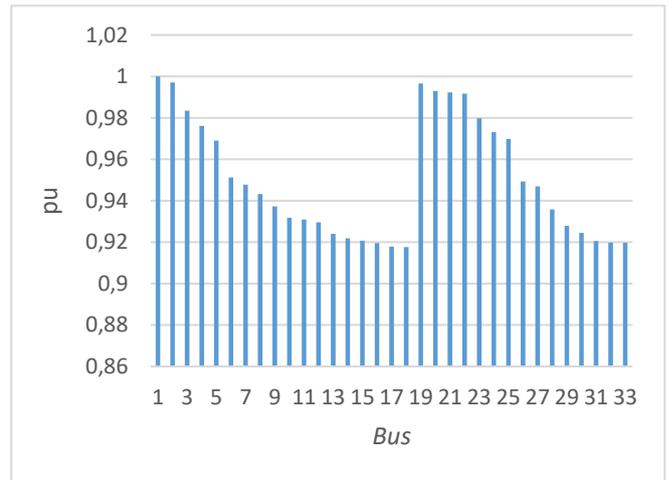
Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)
1	1,0000	12	0,9271	23	0,9794
2	0,9970	13	0,9210	24	0,9727
3	0,9830	14	0,9187	25	0,9694
4	0,9755	15	0,9173	26	0,9479
5	0,9681	16	0,9159	27	0,9453
6	0,9498	17	0,9139	28	0,9339
7	0,9463	18	0,9133	29	0,9257
8	0,9415	19	0,9965	30	0,9221
9	0,9352	20	0,9929	31	0,9180
10	0,9294	21	0,9922	32	0,9171
11	0,9286	22	0,9916	33	0,9168

TABEL III
TEGANGAN BUS SETELAH PENAMBAHAN DUA DG

Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)
1	1,0000	12	0,9296	23	0,9798
2	0,9971	13	0,9240	24	0,9731
3	0,9834	14	0,9219	25	0,9698
4	0,9761	15	0,9207	26	0,9493
5	0,9690	16	0,9196	27	0,9469
6	0,9512	17	0,9179	28	0,9358
7	0,9478	18	0,9176	29	0,9279
8	0,9432	19	0,9966	30	0,9245
9	0,9373	20	0,9930	31	0,9206
10	0,9318	21	0,9923	32	0,9198
11	0,9310	22	0,9917	33	0,9197



Gbr. 7 Profil tegangan sistem 33 bus IEEE sebelum penambahan DG RES.



Gbr. 8 Profil tegangan sistem 33 bus IEEE setelah penambahan DG RES.

B. Hasil Simulasi dengan Dua DG Sumber Energi Terbarukan

Pada skenario kedua, yaitu simulasi dengan penambahan dua DG sumber energi terbarukan, diperoleh lokasi optimal pada bus 18 dan bus 33, dengan DG tipe PV dan berkapasitas 80 kW. Berdasarkan simulasi aliran daya yang dilakukan setelah menambahkan dua DG sumber energi terbarukan, diperoleh total rugi daya nyata pada saluran sebesar 190,4 kW dan total rugi daya reaktif sebesar 126,6 kVAr. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan DG PV 80 kW pada sistem 33 bus IEEE dapat mengurangi rugi daya aktif sebesar 11,8 kW dan daya reaktif sebesar 8,2 kVAr.

Tabel III menunjukkan data hasil simulasi setelah penambahan DG sumber energi terbarukan pada sistem 33 bus IEEE. Dari Tabel III dapat diketahui bahwa tegangan pada bus tidak semuanya normal. Pada bus 7 sampai bus 18 dan pada bus 26 sampai bus 33 masih terjadi *undervoltage*, yaitu tegangan di bawah 0,95 pu. Namun, tegangan pada bus 6 sudah normal, dengan tegangan sebesar 0,9512 pu.

Gbr. 8 menunjukkan grafik profil tegangan pada setiap bus pada simulasi dengan penambahan dua DG sumber energi terbarukan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa tegangan terendah terdapat pada bus 18, dengan tegangan 0,9176 pu, dan tertinggi pada bus sumber, yaitu bus 1, sebesar 1 pu. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan DG sumber energi

terbarukan pada sistem 33 bus IEEE dapat menaikkan tegangan terendah dari 0,9133 pu menjadi 0,9176 pu.

C. Hasil Simulasi dengan Dua DG Sumber Energi Terbarukan Mempertimbangkan Sifat Intermiten

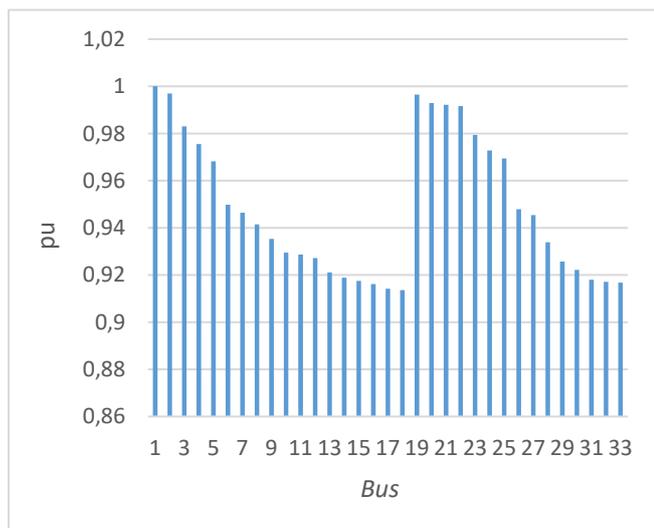
Skenario ketiga adalah simulasi dengan penambahan dua DG sumber energi terbarukan mempertimbangkan variabel sifat intermiten. Pada skenario ketiga ini penambahan dua buah DG sumber energi terbarukan pada sistem 33 bus IEEE mempertimbangkan perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin yang merujuk pada data di Tabel I tentang perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin selama 24 jam. Dari simulasi diperoleh lokasi optimal kedua DG pada bus 18 dengan DG tipe WT dan berkapasitas 80 kW.

Berdasarkan simulasi aliran daya yang dilakukan setelah menambahkan dua DG energi terbarukan mempertimbangkan sifat intermiten pada Tabel IV, diperoleh total rugi daya nyata pada saluran sebesar 196,4 kW dan total rugi daya reaktif sebesar 134,4 kVAr. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan DG sumber energi terbarukan dengan mempertimbangkan variabel sifat intermiten dapat mengurangi rugi daya aktif sebesar 5,8 kW dan daya reaktif sebesar 0,4 kVAr.

Tabel IV menyajikan hasil simulasi profil tegangan sistem 33 bus IEEE setelah penambahan DG sumber energi terbarukan dengan mempertimbangkan variabel sifat intermiten. Dari

TABEL IV
TEGANGAN BUS SETELAH PENAMBAHAN DUA DG DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN SIFAT INTERMITEN

Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)	Bus	Tegangan (pu)
1	1,0000	12	0,9272	23	0,9794
2	0,9970	13	0,9211	24	0,9728
3	0,9830	14	0,9189	25	0,9694
4	0,9755	15	0,9175	26	0,9479
5	0,9682	16	0,9162	27	0,9454
6	0,9498	17	0,9142	28	0,9339
7	0,9464	18	0,9136	29	0,9257
8	0,9415	19	0,9965	30	0,9222
9	0,9353	20	0,9929	31	0,9180
10	0,9295	21	0,9922	32	0,9171
11	0,9287	22	0,9916	33	0,9168



Gbr. 9 Profil tegangan setelah penambahan DG RES intermiten.

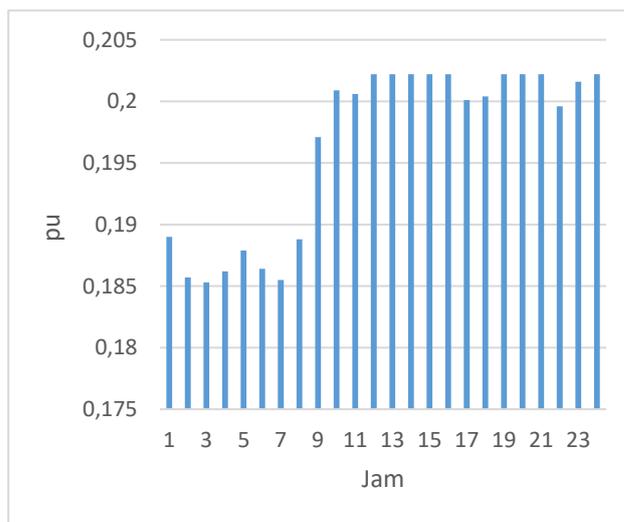
Tabel IV dapat diketahui bahwa tegangan pada bus tidak semuanya normal. Pada bus 7 sampai bus 18 dan pada bus 26 sampai bus 33 masih terjadi *undervoltage*, yaitu tegangan di bawah 0,95 pu.

Gbr. 9 menunjukkan grafik profil tegangan Sistem 33 bus IEEE setelah penambahan DG sumber energi terbarukan dengan mempertimbangkan variabel sifat intermiten. Dari Gbr. 9 terlihat bahwa tegangan terendah terdapat pada bus 18, sebesar 0,9136 pu, dan tertinggi pada bus sumber, yaitu bus 1, sebesar 1 pu. Terjadi penurunan dibandingkan dengan hasil simulasi penambahan dua DG sumber energi terbarukan tanpa mempertimbangkan variabel sifat intermiten.

Tabel V menyajikan rugi-rugi daya aktif setiap jam pada sistem 33 bus IEEE setelah penambahan DG sumber energi terbarukan dengan mempertimbangkan variabel sifat intermiten. Dari Tabel V dapat diketahui rugi daya aktif minimum diperoleh pada pukul 03.00, yaitu 0,1853 pu atau 183 kW. Rugi-rugi daya aktif maksimum, yaitu 0,2022 pu atau 202,2 kW, terjadi pada pukul 12.00 sampai pukul 14.00, pukul 19.00 sampai pukul 21.00, dan pukul 24.00. Perbandingan rugi-rugi daya aktif setiap jam pada sistem 33 bus IEEE setelah penambahan DG sumber energi terbarukan dengan

TABEL V
RUGI-RUGI DAYA AKTIF SETIAP JAM SETELAH PENAMBAHAN DUA DG
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SIFAT INTERMITEN

Jam	Rugi Daya (pu)	Jam	Rugi Daya (pu)
1	0,1890	13	0,2022
2	0,1857	14	0,2022
3	0,1853	15	0,2022
4	0,1862	16	0,2022
5	0,1879	17	0,2001
6	0,1864	18	0,2004
7	0,1855	19	0,2022
8	0,1888	20	0,2022
9	0,1971	21	0,2022
10	0,2009	22	0,1996
11	0,2006	23	0,2016
12	0,2022	24	0,2022

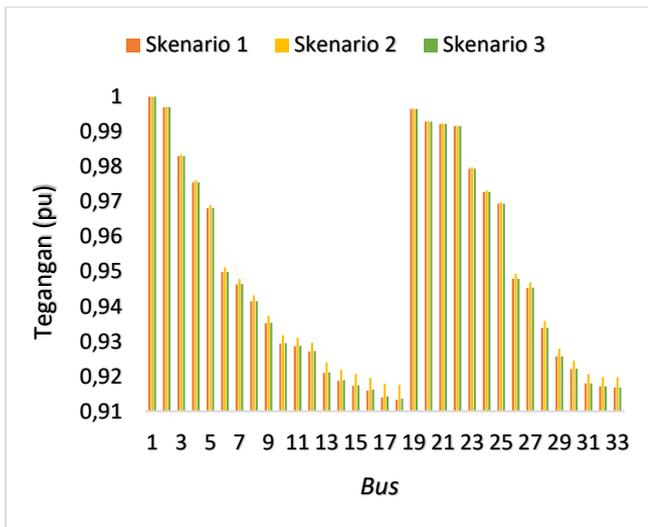


Gbr. 10 Rugi daya aktif setiap jam.

mempertimbangkan variabel sifat intermiten dalam bentuk grafik diperlihatkan pada Gbr. 10

Gbr. 11 menunjukkan perbandingan profil tegangan pada masing-masing bus untuk ketiga skenario. Profil tegangan pada ketiga skenario tersebut adalah profil tegangan sebelum penambahan DG sumber energi terbarukan, setelah penambahan DG sumber energi terbarukan, dan yang ketiga adalah profil tegangan setelah penambahan DG sumber energi terbarukan dengan mempertimbangkan perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa secara keseluruhan profil tegangan terbaik adalah pada skenario penambahan DG sumber energi terbarukan tanpa mempertimbangkan variabel sifat intermiten atau perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin.

Tabel VI menyajikan perbandingan rugi daya pada simulasi tiga skenario. Data hasil simulasi pada Tabel VI menunjukkan bahwa penambahan dua DG sumber energi terbarukan dapat mengurangi rugi daya aktif sebesar 11,8 kW dan daya reaktif sebesar 8,2 kVAr. Namun, apabila penambahan dua DG sumber energi terbarukan mempertimbangkan sifat intermiten atau perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin selama 24 jam, pengurangan rugi daya aktif hanya sebesar 5,8 kW dan



Gbr. 11 Profil tegangan sistem 33 bus IEEE untuk semua skenario.

TABEL VI
PERBANDINGAN RUGI-RUGI DAYA

Kasus	Kondisi	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAr)
1	Sebelum pemasangan DG	202,2	134,8
2	Setelah pemasangan DG RES	190,4	126,6
3	Setelah pemasangan DG RES mempertimbangkan sifat intermiten	196,4	134,4

TABEL VII
ALOKASI DG DENGAN BEBERAPA METODE UNTUK 33 BUS IEEE

Kasus	Metode	Lokasi Optimal (Bus)
Dua DG	LSF [27]	18 dan 33
	IA [27]	6 dan 14
	ELF [27]	12 dan 30
	SOS [28]	13 dan 30
	PSO [29]	13 dan 30
	MVO	18 dan 33

daya reaktif sebesar 0,4 kVAr. Hal ini menunjukkan bahwa rugi-rugi daya minimum dapat diperoleh jika ditambahkan DG sumber energi terbarukan tanpa mempertimbangkan variabel sifat intermiten.

Tabel VII menunjukkan alokasi DG pada sistem 33 bus IEEE menggunakan beberapa metode alokasi. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya pada sistem 33 bus IEEE [27], penempatan dua buah DG dengan metode *Loss Sensitivity Factor* (LSF) akan optimal pada bus 18 dan bus 33. Hal ini sama dengan lokasi optimal dengan menggunakan metode yang digunakan pada makalah ini, yaitu metode algoritme MVO. Sementara itu, hasil penelitian dengan menggunakan metode *Improved Analytical* (IA) optimal pada bus 6 dan bus 14, sedangkan metode *Exhaustive Load Flow* (ELF) pada bus 12 dan bus 30 [27]. Hasil yang berbeda diperoleh menggunakan metode *Symbiotic Organisms Search* (SOS), yang menemukan lokasi optimal pada bus 13 dan bus 30 [28], sedangkan dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

diperoleh lokasi optimal pada bus 13 dan bus 30 [29]. Berdasarkan Tabel VII, diketahui bahwa lokasi optimal penempatan DG dapat bervariasi berdasarkan metode optimasi yang digunakan, walaupun menggunakan sistem yang sama seperti sistem 33 bus IEEE.

VI. KESIMPULAN

Setelah simulasi dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Alokasi optimal DG sumber energi terbarukan yang diperoleh dengan menggunakan MVO adalah pada bus 18 dan bus 33 dengan tipe DG PV. Pada simulasi yang mempertimbangkan variabel sifat intermiten, yaitu simulasi yang memasukkan data perkiraan iradiasi matahari dan kecepatan angin selama 24 jam, diperoleh lokasi penempatan DG pada bus 18 sebanyak dua DG tipe turbin angin. Sebelum pemasangan DG, rugi daya aktif adalah 202,2 kW dan rugi daya reaktif adalah 134,8 kVAr. Setelah pemasangan DG terbarukan, rugi daya aktif adalah 190,4 kW dan rugi daya reaktif adalah 126,6 kVAr. Kemudian, dengan mempertimbangkan variabel sifat intermiten, rugi daya aktif adalah 196,4 kW dan rugi daya reaktif adalah 134,4 kVAr.

REFERENSI

- [1] N. Pragallapati dan V. Agarwal, "Distributed PV Power Extraction Based on a Modified Interleaved SEPIC for Nonuniform Irradiation Conditions," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 5, No. 5, hal. 1442–1453, Sep. 2015.
- [2] N. Hayashi, A. Matsushita, D. Inoue, M. Matsumoto, T. Nagata, H. Higuchi, Y. Aya, dan T. Nakagawa, "Nonuniformity Sunlight-Irradiation Effect on Photovoltaic Performance of Concentrating Photovoltaic Using Microsolar Cells Without Secondary Optics," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 6, No. 1, hal. 350–357, Jan. 2016.
- [3] S. Kolesnik, M. Sitbon, S. Lineykin, E. Batzelis, S. Papathanassiou, T. Suntio, dan A. Kuperman, "Solar Irradiation Independent Expression for Photovoltaic Generator Maximum Power Line," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 7, No. 5, hal. 1416–1420, Sep. 2017.
- [4] I. Kim dan R.G. Harley, "The Transient Behavior of the Volt/Var Control of Photovoltaic Systems for Solar Irradiation Variations," *2016 IEEE Electr. Power Energy Conf. (EPEC)*, 2016, hal. 1–5.
- [5] M. Fan, "A Novel Optimal Generation Dispatch Algorithm to Reduce the Uncertainty Impact of Renewable Energy," *2016 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. (PESGM)*, 2016, hal. 1–5.
- [6] J. Hussain dan M.K. Mishra, "An Efficient Wind Speed Computation Method Using Sliding Mode Observers in Wind Energy Conversion System Control Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 1, hal. 730–739, Jan. 2020.
- [7] J. Kazda, M. Mirzaei, dan N.A. Cutululis, "On the Architecture of Wind Turbine Control Required for Induction-based Optimal Wind Farm Control," *2018 Ann. Am. Control Conf. (ACC)*, 2018, hal. 3074–3079.
- [8] J. Hussain dan M.K. Mishra, "Sliding Mode Observers Based Wind Speed Computation Method in Wind Energy Conversion Systems Control Applications," *2018 IEEE Int. Conf. Power Electron., Drives Energy Syst. (PEDES)*, 2018, hal. 1–6.
- [9] A. Ramadan, M. Ebeed, S. Kamel, dan L. Nasrat, "Optimal Allocation of Renewable Energy Resources Considering Uncertainty in Load Demand and Generation," *2019 IEEE Conf. Power Electron. Renew. Energy (CPERE)*, 2019, hal. 124–128.
- [10] S. Kandil dan H.E. Farag, "Impacts of Binding Constraints on the Planning Process of Renewable DG in Distribution Systems," *2015 IEEE Electr. Power Energy Conf. (EPEC)*, 2015, hal. 451–456.
- [11] S. Nawaz, A.K. Bansal, dan M.P. Sharma, "A Novel DG Allocation Method for Power Loss Reduction in Radial Distribution System," *2016 IEEE 7th Power India Int. Conf. (PIICON)*, 2016, hal. 1–4.

- [12] A. Alhamali, M.E. Farrag, G. Bevan, dan D.M. Hepburn, "Determination of Optimal Site and Capacity of DG Systems in Distribution Network based on Genetic Algorithm," *2017 52nd Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, 2017, hal. 1–6.
- [13] R. Prithvi dan M.R. Manjunath, "A Practical Approach for Optimal Allocation of Dispatchable and Non-dispatchable DG Units in Distribution Systems," *2017 Innov. Power Adv. Comput. Technol. (i-PACT)*, 2017, hal. 1–7.
- [14] A.R. Gupta, "Effect of Optimal Allocation of Multiple DG dan D-STATCOM in Radial Distribution System for Minimising Losses and THD," *Int. Symp. Embed. Comput. Syst. Design (ISED)*, 2017, hal. 1 - 5.
- [15] A. Chowdhury, R. Roy, dan K.K. Mandal, "Comparative Study of Single and Multiple Point Renewable Energy Based DG Allocation Considering Improvement of Voltage Stability, Economic and Environmental Factors Using Jaya Algorithm," *2017 Int. Conf. Comput., Electr. Commun. Eng. (ICCECE)*, 2017, hal. 1–7.
- [16] S. Bhuyan, M. Das, dan K.C. Bhuyan, "Particle Swarm Optimizations Based DG Allocation in Local PV Distribution Networks for Voltage Profile Improvement," *2017 Int. Conf. Comput., Electr. Commun. Eng. (ICCECE)*, 2017, hal. 1–4.
- [17] M.H. Albadi, A.S. Al-Hinai, N.N. Al-Abri, Y.H. Al-Busafi, dan R.S. Al-Sadairi, "Optimal Allocation of Renewable-Based DG Resources in Rural Areas Using Genetic Algorithms," *2012 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, 2012, hal. 1–4.
- [18] I.N. Trivedi, P. Jangir, N. Jangir, S.A. Parmar, M. Bhoje, dan A. Kumar, "Voltage Stability Enhancement and Voltage Deviation Minimization Using Multi-Verse Optimizer Algorithm," *2016 Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. (ICCPCT)*, 2016, hal. 1–5.
- [19] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, dan A. Hatamlou, "Multi-Verse Optimizer: A Nature-inspired Algorithm for Global Optimization," *Neural Comput. Appl.*, Vol. 27, No. 2, hal. 495–513, Feb. 2016.
- [20] K.M. Bataineh dan A. Hamzeh, "Efficient Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Application under Rapid Changing Weather Condition," *Int. Sch. Res. Notices Renew. Energy*, Vol. 2014, hal. 1-13, 2014.
- [21] R. Ramaprabha dan B.L. Matur "Development of an Improved Model SPV Cell for Partially Shaded Solar Photovoltaic Arrays," *Eur. J. Sci. Res.*, Vol. 47, No. 1, hal. 122-134, 2010.
- [22] T.G. Hlalele, R.M. Naidoo, J. Zhang, dan R.C. Bansal, "Dynamic Economic Dispatch with Maximal Renewable Penetration Under Renewable Obligation," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 38794–38808, 2020.
- [23] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, dan R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, No. 1, hal. 360–370, Feb. 2010.
- [24] A. Zidan, H.A. Gabbar, dan A. Eldessouky, "Optimal Planning of Combined Heat and Power Systems within Microgrids," *Energy*, Vol. 93, hal. 235–244, Des. 2015.
- [25] F.A. Mohamed dan H.N. Koivo "System Modelling and Online Optimal Management of Micro Grid Using Mesh Adaptive Direct Search," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 32, No. 5, hal. 398–407, 2010.
- [26] P. Li, P. Han, S. He, dan X. Wang, "Double-uncertainty Optimal Operation of Hybrid AC/DC Microgrids with High Proportion of Intermittent Energy Sources," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, Vol. 5, No. 6, hal. 838–849, Nov. 2017.
- [27] D.Q. Hung dan N. Mithulananthan, "Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 4, hal. 1700–1708, Apr. 2013.
- [28] U. Umar, G. Setyawan, F. Faanzir, F. Firdaus, D. Fajar U.P., A. Soeprijanto, dan O. Penangsang, "New Enhanced Symbiotic Organisms Search for Optimal Location and Sizing of Distributed Generation in Radial Distribution System," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, Vol. 13, No. 5, hal. 170–180, Okt. 2020.
- [29] S. Kansal, V. Kumar, dan B. Tyagi, "Hybrid Approach for Optimal Placement of Multiple DGs of Multiple Types in Distribution Networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 75, hal. 226–235, Feb. 2016.