

Penempatan Dan Penentuan Kapasitas Optimal *Distributed Generator (DG) Menggunakan Artificial Bee Colony (ABC)*

Ahmad Zakaria H, Sjamsjul Anam, dan Imam Robandi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Gebang Lor 12, Surabaya 60111

E-mail: robandi@ee.its.ac.id

Abstrak—*Distributed Generator (DG)* merupakan pembangkit berkapasitas kecil yang terletak pada sistem distribusi tenaga listrik dan biasanya ditempatkan pada bus-bus yang terhubung langsung ke beban. Parameter-parameter yang perlu diperhatikan dalam pemasangan DG antara lain level tegangan dan kerugian daya. *Artificial Bee Colony (ABC)* merupakan kecerdasan buatan yang menirukan perilaku sekumpulan lebah dalam mencari sari bunga (*nectar*). Pada tugas akhir ini dilakukan optimisasi penentuan letak dan kapasitas optimal DG dengan menggunakan algoritma ABC pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus. Simulasi dilakukan menggunakan *software MATLAB*. Dari hasil simulasi yang diperoleh, pemasangan DG pada sistem distribusi dapat menaikkan level tegangan pada tiap bus dan mengurangi total kerugian daya pada sistem.

Kata Kunci—*Artificial Bee Colony, Distributed Generator, Level Tegangan, Kerugian Daya.*

I. PENDAHULUAN

SALAH satu hal yang menjadi masalah utama sistem pembangkit tenaga listrik di Indonesia saat ini adalah mengenai sumber energi primer yang digunakan. Sebagian besar sumber energi primer yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik di Indonesia merupakan sumber energi tak terbarukan. Apabila sumber energi tak terbarukan tersebut digunakan secara terus-menerus dalam jumlah yang besar, maka semakin lama sumber energi tersebut akan habis. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem pembangkit tenaga listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan. Salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan adalah *Distributed Generator* [1].

Distributed Generator (DG) merupakan pembangkit berkapasitas kecil yang terletak pada sistem distribusi tenaga listrik. DG biasa ditempatkan pada bus-bus yang terhubung langsung ke beban [2]. Pemasangan DG mempunyai banyak keuntungan, yaitu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem serta dapat memperbaiki kualitas daya dan level tegangan [1,2]. DG juga menimbulkan beberapa kerugian, misal menambah jumlah sumber arus hubung singkat apabila terjadi gangguan pada sistem. Oleh karena itu, ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam pemasangan DG. Parameter-parameter yang dapat digunakan adalah besar arus hubung singkat, level tegangan serta kerugian pada sistem.

Salah satu hal yang sangat penting dalam pembahasan DG adalah mengenai penentuan letak dan kapasitas optimal dari suatu DG. Letak dan kapasitas DG dapat dikatakan optimal apabila menghasilkan penambahan arus hubung singkat dan kerugian daya yang minimal serta level tegangan yang terjaga, yaitu berada di antara nilai minimal dan nilai maksimal [1]. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu menyelesaikan permasalahan optimisasi letak dan kapasitas DG dengan memperhatikan syarat-syarat di atas.

Pada tugas akhir ini, metode yang digunakan adalah metode *Artificial Bee Colony (ABC)*. Metode ini merupakan salah satu jenis dari Kecerdasan Buatan atau *Artificial Intelligent (AI)*. ABC merupakan metode pencarian nilai optimal yang terinspirasi oleh perilaku koloni lebah dalam mencari *nectar*. Dalam menentukan sumber makanan, koloni lebah terbagi menjadi tiga kelompok yaitu lebah pekerja, lebah penjelajah dan lebah pengintai. Lebah-lebah ini menentukan letak dan besar suatu sumber *nectar* kemudian mengingat dan membandingkan dengan sumber lain. Pada akhir fungsi dipilih suatu lokasi dengan sumber *nectar* yang paling optimal [3]. Dengan menerapkan metode ABC ini, diharapkan proses penentuan letak dan kapasitas optimal DG menjadi lebih efektif dan efisien.

II. DASAR TEORI

A. *Distributed Generator*

Istilah *Distributed Generation* sering digunakan untuk menyatakan sebuah pembangkitan listrik skala kecil. Saat ini, belum ada kesepakatan yang dibuat untuk mendefinisikan *Distributed Generation* secara pasti. Beberapa negara mendefinisikan *Distributed Generation* berdasarkan tingkat tegangan, sedangkan negara yang lain mendefinisikan *Distributed Generation* berdasarkan letak pembangkit pada sistem jaring listrik.

International Council on Large Electricity Systems (CIGRE) mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai setiap unit pembangkit dengan kapasitas maksimum 50 MW sampai 100 MW, yang biasa terhubung ke jaring distribusi. Di sisi lain *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai pembangkitan energi listrik yang dilakukan oleh peralatan yang lebih kecil dari pembangkit listrik pusat sehingga memungkinkan terjadi interkoneksi di hampir semua titik pada

sistem tenaga listrik. Sedangkan *International Energy Agency* (IEA), mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai unit pembangkit daya listrik pada sisi konsumen dan menyuplai daya listrik langsung ke jaring distribusi lokal.

Definisi yang berbeda diusulkan dalam literatur, yang mendefinisikan *Distributed Generation* berdasarkan koneksi dan letak, bukan berdasarkan kapasitas pembangkitan. Berdasarkan pengertian-pengertian di atas dan mempertimbangkan sistem kelistrikan di Indonesia, istilah *Distributed Generator* (DG) yang akan digunakan pada bab-bab berikutnya adalah unit pembangkit listrik yang terhubung langsung ke jaring distribusi atau di sisi konsumen dengan kapasitas yang relatif kecil (kurang dari 10 MW) [4].

B. Aliran Daya [5]

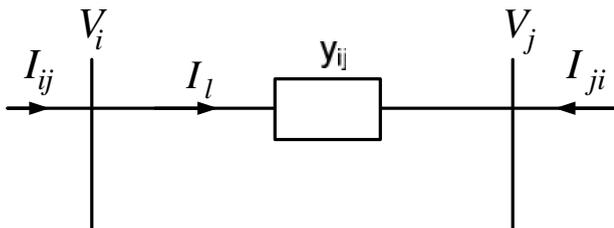
Informasi dasar yang diperoleh dari studi aliran daya adalah magnitudo dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dan aliran daya reaktif dan aktif pada setiap saluran. Data yang diperlukan untuk studi aliran daya adalah matriks Y_{bus} atau matriks Z_{bus} dari sistem yang akan dipelajari. Kemudian data jenis-jenis bus, termasuk ke dalam jenis bus beban atau bus generator. Jika pada bus terdapat generator, maka bus tersebut disebut sebagai bus generator. Sedangkan bus yang tidak memiliki generator disebut sebagai bus beban. Pada setiap bus generator perlu dimasukkan data pembangkitan daya aktif pada generator, kemudian pada bus beban juga perlu dimasukkan data beban.

Ada satu bus generator yang tidak ditentukan besar pembangkitan daya aktif, yang disebut *slack* atau *swing* bus. Swing bus ini terhubung dengan generator yang memiliki kapasitas daya paling besar pada sistem. Generator pada *swing* bus mensuplai perbedaan antara daya aktif ke dalam sistem pada bus lain dan total keluaran ditambah *losses*. *Magnitude* dan sudut tegangan pada *swing* bus telah ditentukan terlebih dahulu.

Dalam proses pemasangan DG pada sistem distribusi perlu mengetahui aliran daya pada sistem distribusi dan diketahui bahwa persamaan pada permasalahan analisis aliran daya adalah persamaan nonlinier yang harus diselesaikan menggunakan teknik iterasi. Ada beberapa teknik yang umum digunakan, namun pada Tugas Akhir ini metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah metode *Newton Rapshon*.

C. Perhitungan Kerugian Daya Saluran [5]

Pemasangan DG mempertimbangkan kerugian daya pada saluran sehingga perlu menghitung rugi saluran distribusi dari perhitungan *line flow*.



Gambar 1. Pemodelan saluran distribusi untuk perhitungan aliran daya

Dengan memisalkan suatu saluran yang menghubungkan bus *i* dan *j* seperti ditunjukkan pada gambar 1, maka arus pada saluran dapat diperoleh dari persamaan berikut, dari bus *i* ke *j*

$$I_{ij} = I_l = y_{ij}(V_i - V_j) \tag{1}$$

sedangkan dari bus *j* ke *i*

$$I_{ji} = -I_l = y_{ij}(V_j - V_i) \tag{2}$$

Besar daya total yang mengalir dari bus *i* ke *j* dan dari *j* ke *i* adalah,

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \tag{3}$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \tag{4}$$

Kerugian daya saluran *i* ke *j* adalah jumlah aljabar dari persamaan (3) dan (4), yaitu

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \tag{5}$$

D. Artificial Bee Colony

Metode optimisasi yang digunakan untuk menentukan letak dan kapasitas dari masing-masing bank kapasitor adalah metode berbasis kawanan lebah yaitu *Artificial Bee Colony* (ABC). ABC adalah sebuah metode optimisasi yang terinspirasi oleh perilaku mencari makan lebah madu diperkenalkan oleh Karaboga pada tahun 2005 [6].

ABC adalah suatu metode pencarian nilai optimal yang terinspirasi oleh kegiatan/pola dari kawanan lebah dalam mencari makanan. Dalam metode ini, perilaku cerdas tertentu dari sekawanan lebah madu berupa perilaku mencari makan ditinjau, dan sebuah algoritma baru dari koloni lebah buatan (*Artificial Bee Colony*) yang mensimulasikan perilaku lebah madu tersebut dijelaskan untuk memecahkan permasalahan optimisasi multidimensi dan multimodal. Dalam model ABC *algorithm*, koloni lebah buatan terdiri dari tiga kelompok lebah, yaitu: lebah pekerja, lebah *onlooker* dan lebah *scout*. Lebah yang menunggu di *dance area* untuk membuat keputusan dalam memilih sumber makanan, disebut sebagai lebah *onlooker* dan lebah yang pergi ke sumber makanan yang pernah dikunjungi sendiri sebelumnya, diberi nama lebah pekerja. Sedangkan lebah yang melakukan pencarian acak disebut lebah *scout*. Untuk setiap sumber makanan, hanya ada satu lebah pekerja. Lebah pekerja yang sumber makanannya telah habis akan menjadi lebah *scout* [7].

Langkah-langkah utama proses optimisasi algoritma ABC dapat diuraikan sebagai berikut,

1. Inisialisasi posisi sumber makanan.
2. Gerakkan lebah pekerja menuju sumber-sumber makanan dan tentukan jumlah *nectar*.
Untuk tiap lebah pekerja, sebuah sumber makanan baru dihasilkan melalui rumusan,

$$v_{ij} = x_{ij} + \Phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \tag{6}$$
3. Gerakkan lebah *onlooker* menuju sumber-sumber makanan dan tentukan jumlah nektarnya. Pada langkah ini, lebah

onlooker memilih sebuah sumber makanan dengan menggunakan perhitungan probabilitas dan mendapatkan sebuah sumber makanan baru dalam area sumber makanan yang telah dipilih melalui rumusan,

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \tag{7}$$

4. Tentukan sumber makanan yang harus ditinggalkan dan alokasikan lebah pekerjanya sebagai scout untuk mencari sumber makanan baru berdasarkan pencarian secara acak dengan memakai rumusan,

$$x_i^j = x_{min}^j + rand[0,1](x_{max}^j - x_{min}^j) \tag{8}$$

5. Catat sumber makanan terbaik yang telah ditemukan sejauh ini.
6. Ulangi langkah 2-5 hingga kriteria yang diinginkan terpenuhi.

III. METODE PENELITIAN

A. Algoritma ABC pada Proses Optimisasi Penempatan DG

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan penentuan letak dan kapasitas optimal DG pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan software MATLAB 7.3. Dalam Tugas Akhir ini, langkah awal yang harus dilakukan adalah merepresentasikan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menentukan letak DG menjadi parameter algoritma ABC sehingga pencarian secara acak oleh lebah dapat dilakukan.

Tabel 1.

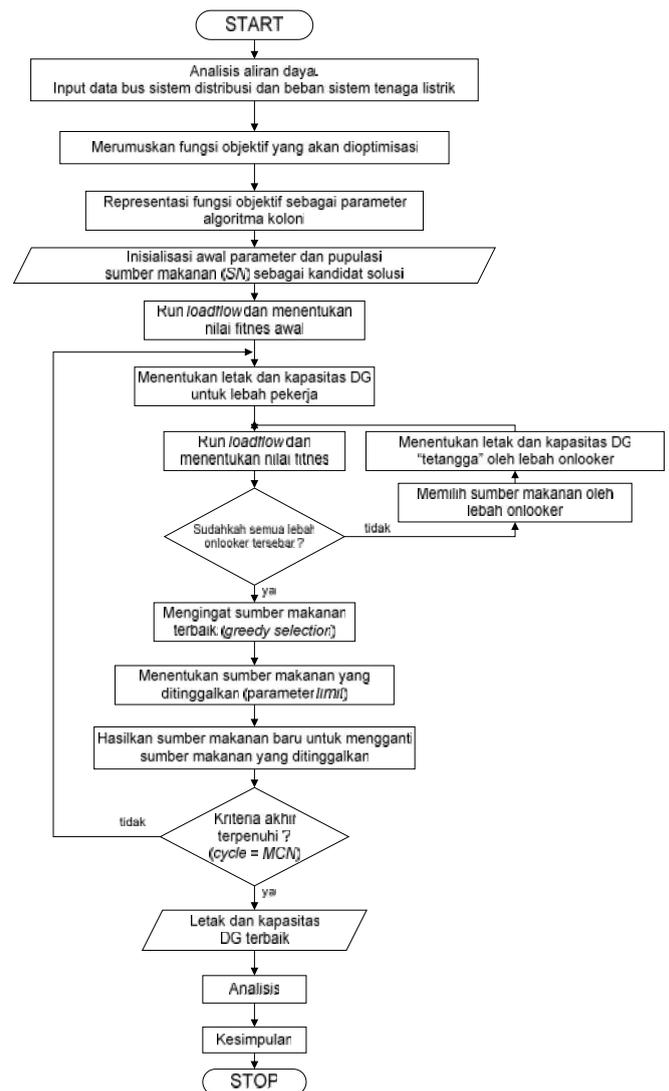
Representasi algoritma ABC untuk optimisasi DG

Algoritma ABC	Optimisasi Pemasangan DG
Posisi Sumber Makanan	Kandidat kapasitas DG yang akan dipasang
Jumlah Sumber Makanan atau Jumlah Lebah	Jumlah bus yang menjadi kandidat tempat pemasangan DG
Fungsi objektif = Fitness	$\min \sum P_{loss}$

Dalam proses optimisasi, populasi lebah akan menentukan letak bus yang akan dipasang DG dan kapasitas DG terpasang untuk memperoleh nilai fitness yang mewakili nilai kerugian pada jaring distribusi.

Kawanan lebah ini akan menyebar dan kemudian mencari sumber makanan secara acak. Setelah menemukan sumber makanan baru, lebah akan menghitung nektar dari setiap sumber makanan yang ditemukan. Hasil perhitungan dari setiap sumber makanan yang ditemukan akan diseleksi dan diingat oleh lebah sehingga diperoleh sumber makanan terbaik.

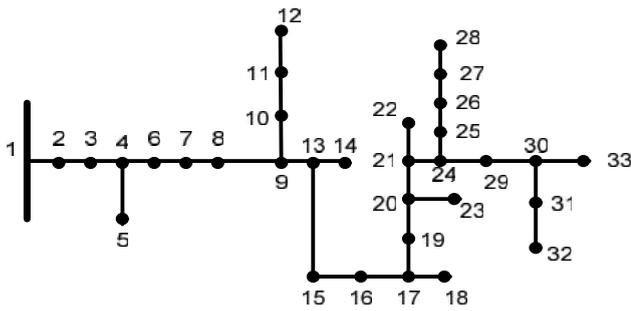
Hasil terbaik adalah kerugian daya aktif total minimum dari proses seleksi dari sekian banyak solusi yang dihasilkan pada saat pemasangan DG.



Gambar 2. Diagram alir implementasi Algoritma ABC untuk optimisasi DG

B. Sistem Distribusi Radial IEEE 33 Bus

Sistem yang digunakan adalah sistem distribusi yang diambil dari [12] yang terdiri dari 33 bus dan semuanya adalah bus beban kecuali bus 1 yang merupakan slack bus yang digunakan sebagai bus referensi. Single line diagram sistem distribusi radial IEEE 33 bus dapat dilihat pada gambar 3. Sedangkan data saluran dan beban diperlihatkan pada tabel 2 dan tabel 3.



Gambar 3. Single line diagram sistem distribusi radial IEEE 33 bus

Penyelesaian analisis aliran daya dilakukan menggunakan metode Newton-Raphson didasarkan pada:

1. Base tegangan = 34.5 kV
2. Base daya = 100 MVA
3. Akurasi = 0.0001
4. Akselerasi = 1.1
5. Maksimum iterasi = 100

Tabel 2.

Data beban pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus [12]

Nomor Bus	Beban Aktif Tersuplai (kW)	Beban Reaktif Tersuplai (kVar)
1	0	0
2	55	29
3	0	0
4	16	8
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	5	2
10	34	17
11	135	70
12	0	0
13	44	22
14	0	0
15	7	3
16	45	20
17	4	2
18	0	0
19	0	0
20	15	7
21	34	18
22	0	0
23	450	225
24	146	73
25	9	5
26	450	338
27	0	0
28	60	48
29	142	91
30	40	20
31	28	14
32	0	0
33	27	21
Total	1746	1033

Tabel 3.

Data impedansi saluran sistem distribusi radial IEEE 33 bus

Saluran (Bus Asal-Bus Tujuan)	Panjang (Mil)	R(Ohm)	X(Ohm)
1-2	0.488	0.9431	0.6898
2-3	0.328	0.6324	0.4625
3-4	6.1	11.7871	8.6165
4-5	1.1	3.0775	1.5517
4-6	7.1	13.7082	10.0254
6-7	5.63	10.8678	7.9481
7-8	0.001	0.19	0.139
8-9	0.06	0.1133	0.0829
9-10	0.32	0.9054	0.4811
9-13	1.93	3.7322	2.7296
10-11	9.11	35.4945	13.74545
11-12	2.6	7.2751	3.8659
13-14	0.57	1.6043	0.8525
13-15	0.16	0.3071	0.2251
15-16	3.87	7.4719	5.48
16-17	0.98	0.19	0.139
17-18	4.41	8.5283	6.2548
17-19	6.97	13.4632	9.8742
19-20	0.001	0.19	0.139
20-21	0.93	1.7912	1.3137
20-23	2	2.6737	2.6686
21-22	0.31	0.8578	0.4588
21-24	1.1	2.1312	1.563
24-25	0.05	0.1024	0.075
24-29	0.38	0.7384	0.54
25-26	0.26	0.4935	0.3609
26-27	0.69	1.3306	0.9759
27-28	0.1	0.1937	0.1421
29-30	0.5	0.9797	0.7185
30-31	0.053	0.1024	0.075
30-33	0.162	0.3144	0.2306
31-32	0.92	1.7689	1.3082

C. Sasaran Optimisasi Pemasangan DG

Untuk operasi yang efisien dan dapat diandalkan pada sebuah sistem tenaga, pemasangan DG pada sistem tenaga listrik harus mencapai beberapa sasaran berikut :

1. Tegangan terminal semua peralatan dalam sistem berada pada batas yang dapat diterima.
2. Pemasangan DG dapat mengurangi kerugian daya pada sistem

Supaya sasaran-sasaran tersebut terpenuhi, maka performansi aliran daya pada sistem diusahakan memenuhi batasan batasan berikut ini:

1. Batasan tegangan yang diijinkan berada pada $\pm 0,5\%$.

$$V^{min} \leq V_i \leq V^{maks} \quad \text{untuk } i=1,2,3,\dots,N$$

Keterangan :

-i = nomor bus

- V^{min} = 0.95 pu

- V^{maks} = 1.05 pu

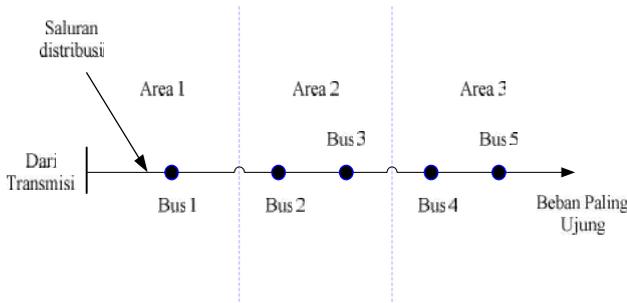
2. Fungsi obyektif yang digunakan untuk penentuan letak dan kapasitas DG terpasang adalah:

$$F = \min \Sigma P_{\text{loss}}$$

$\min \Sigma P_{\text{loss}}$ = Total kerugian daya aktif minimum pada saluran (MW)

D. Metode Pembagian Area

Metode pembagian area merupakan metode penentuan letak optimal DG. Metode ini membagi area sistem distribusi menjadi tiga bagian berdasarkan nilai beban. Tiap area memiliki nilai beban yang besarnya sepertiga dari nilai beban total. Untuk lebih jelas, dapat dilihat gambar 4.



Gambar 4. Metode pembagian area

Metode pembagian area didasarkan pada prinsip bahwa letak DG yang paling optimal adalah letak yang dapat menyuplai bus beban yang terjauh dari pembangkit utama. Sehingga listrik tidak perlu melewati kawat yang panjang yang dapat menyebabkan kerugian daya semakin besar.

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

A. Simulasi Aliran Daya

Sebelum melakukan simulasi aliran daya, data impedansi saluran sistem harus diubah dulu ke dalam satuan per unit (p.u.) dengan menggunakan rumus :

$$Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}} \tag{9}$$

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \tag{10}$$

Untuk mengetahui kondisi awal dari sistem distribusi 33 bus, maka sebelum pemasangan DG dilakukan simulasi aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson*. Kondisi awal yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil simulasi aliran daya setelah dilakukan pemasangan DG sehingga akan diketahui tingkat keberhasilan proses optimisasi pemasangan DG dengan melihat level tegangan dan total kerugian di saluran distribusi 33 bus sebelum dan setelah pemasangan DG. Kerugian daya pada masing-masing saluran simulasi aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4, dan level tegangan pada masing-masing bus ditunjukkan pada Tabel 5.

Parameter yang digunakan pada metode *Newton-Raphson* sebagai solusi untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya adalah sebagai berikut :

1. Base tegangan (kV_{base}) = 34.5 kV

2. Base daya (MVA_{base}) = 100 MVA
3. Akurasi = 0.0001
4. Akselerasi = 1.1
5. Maksimum iterasi = 100

Dari hasil simulasi aliran daya, dapat dilihat bahwa hampir semua bus memiliki level tegangan di bawah batas yang diijinkan. Pada tabel 4, sebelum dipasang DG nilai level tegangan pada bus 7 sampai dengan bus 33 berada di bawah batas toleransi. Sedangkan pada data tabel 5 diperoleh total kerugian daya aktif sebelum pemasangan DG sebesar 406.866 kW.

B. Simulasi Penerapan Metode ABC dan Metode Pembagian Area Pada Pemasangan DG

1) Simulasi 1

Pada simulasi 1, pemasangan DG dilakukan dengan mengkombinasikan metode pembagian area dan algoritma ABC. Dari tabel 2, total beban aktif adalah 1746 kW. Sehingga pembagian area sistem distribusi 33 bus berdasarkan beban aktif adalah sebagai berikut :

- a) Batas area 1

$$\frac{1}{3} \times 1746 = 582 \text{ kW}$$

Dari perhitungan diperoleh bahwa nilai beban sebesar 582 kW terletak di antara bus 21 dan bus 23.

- b) Batas area 2

$$\frac{2}{3} \times 1746 = 1164 \text{ kW}$$

Dari perhitungan diperoleh bahwa nilai beban sebesar 1164 kW terletak di antara bus 25 dan bus 26.

Sesuai dengan metode pembagian area berdasarkan beban, maka bus kandidat yang akan dipasang DG adalah bus 25 dan bus 26. Oleh karena itu, algoritma ABC akan diterapkan dengan parameter-parameter sebagai berikut :

- a. Colony size : 4
- b. Maximum cycle : 100

2) Simulasi 2

Pada simulasi 1, pemasangan DG juga dilakukan dengan mengkombinasikan metode pembagian area dan algoritma ABC. Sedangkan yang menjadi kandidat adalah semua bus pada area 2 dan area 3, yaitu bus 21 sampai dengan bus 33. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui seberapa jauh kinerja dari Algoritma ABC pada optimisasi pemasangan DG. Parameter yang digunakan pada simulasi 2 adalah :

- a. Colony size : 26
- b. Maximum cycle : 300

Tabel 4.

Level Tegangan dan Pembangkitan Pada Simulasi 1 dan 2

No. Bus	Level Tegangan (pu)			Pembangkitan (kW)	
	Sebelum Pemasangan DG	Simulasi 1	Simulasi 2	Simulasi 1	Simulasi 2

1	1.020	1.020	1.020	226	245
2	1.018	1.019	1.019	0	0
3	1.016	1.019	1.019	0	0
4	0.987	1.010	1.009	0	0
5	0.987	1.010	1.009	0	0
6	0.954	1.000	0.999	0	0
7	0.927	0.992	0.991	0	0
8	0.927	0.991	0.991	0	0
9	0.927	0.991	0.991	0	0
10	0.926	0.991	0.991	0	0
11	0.921	0.986	0.986	0	0
12	0.921	0.986	0.986	0	0
13	0.866	0.991	0.990	0	0
14	0.866	0.991	0.990	0	0
15	0.866	0.991	0.990	0	0
16	0.849	0.988	0.987	0	0
17	0.849	0.988	0.986	0	0
18	0.849	0.988	0.986	0	0
19	0.821	0.983	0.981	0	0
20	0.820	0.983	0.981	0	0
21	0.818	0.983	0.981	0	0
22	0.818	0.983	0.981	0	0
23	0.819	0.981	0.980	0	0
24	0.815	0.983	0.982	0	0
25	0.815	0.983	0.982	0	0
26	0.814	0.984	0.982	1601	1582
27	0.814	0.984	0.982	0	0
28	0.814	0.984	0.982	0	0
29	0.815	0.983	0.982	0	0
30	0.814	0.983	0.981	0	0
31	0.814	0.983	0.981	0	0
32	0.814	0.983	0.981	0	0
33	0.814	0.983	0.981	0	0
Total				1827	1827

Tabel 5.

Perbandingan kerugian aktif (MW) saluran sebelum dan setelah pemasangan DG pada simulasi 1 dan 2

No	Saluran		Sebelum pemasangan DG	Setelah Pemasangan DG	
	Dari	Ke		Simulasi 1	Simulasi 2
1	1	2	4.69	0.916	0.923
2	2	3	2.989	0.572	0.575
3	3	4	55.711	10.652	10.718
4	4	5	0	0	0
5	4	6	63.848	12.185	12.255
6	6	7	50.619	9.660	9.716
7	7	8	0.885	0.169	0.170
8	8	9	0.528	0.101	0.101
9	9	10	0.032	0.028	0.028
10	9	13	143.977	27.284	27.254
11	10	11	0.813	0.709	0.71
12	11	12	0	0	0
13	13	14	0	0	0
14	13	15	1.123	0.216	0.216
15	15	16	27.095	5.241	5.223
16	16	17	0.651	0.130	0.129
17	17	18	0	0	0
18	17	19	45.918	9.179	9.124
19	19	20	0.648	0.130	0.129
20	20	21	2.881	1.302	1.267
21	20	23	0.848	0.591	0.593
22	21	22	0	0	0
23	21	24	3.2	1.593	1.55

24	24	25	0.055	0.118	0.114
25	24	29	0.072	0.05	0.05
26	25	26	0.256	0.574	0.558
27	26	27	0.010	0.007	0.007
28	27	28	0.001	0.001	0.001
29	29	30	0.015	0.010	0.010
30	30	31	0	0	0
31	30	33	0	0	0
32	31	32	0	0	0
Total			406.866	81.417	81.424

Dari tabel 4, pada simulasi 1 maupun 2 letak optimal DG adalah pada bus 13 dengan kapasitas 1601 kW untuk simulasi 1 dan 1582 untuk simulasi 2. Dari tabel 4 terlihat jelas pengaruh pemasangan DG terhadap level tegangan. Setelah pemasangan DG, semua bus memiliki level tegangan yang berada pada batas toleransi. Sedangkan dari tabel 5, total kerugian daya aktif setelah pemasangan DG menurun hampir 80% dari keadaan sebelum pemasangan DG. Secara garis besar, hasil dari simulasi 1 dan simulasi 2 adalah hampir sama, namun hasil simulasi 1 menghasilkan nilai rugi daya aktif lebih kecil daripada simulasi 2.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa pemasangan DG pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus dapat mengurangi kerugian daya aktif sistem yang sangat signifikan sekaligus meningkatkan level tegangan pada tiap bus sehingga mencapai batas toleransi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Elnashar, Ramadan El Shatshat, and Magdy M.A. Salama. "Optimum Siting and Sizing of A Large Distributed Generator in A Mesh Connected System". *Electric Power Systems Research*, 80, (2009), 690-697.
- [2] Tuba Gozel, and M. Hakan Hocaoglu. "An Analytical Method for The Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems". *Electric Power System Research*, 79, (2009) 912-918.
- [3] Sulistyono, Danang. "Penentuan Letak dan Kapasitas Bank Kapasitor Secara Optimal pada Jaring Transmisi Menggunakan Bee Colony Algorithm". Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. (2010).
- [4] K. Purchala, R. Belmans. "Distributed Generation and Grid Integration Issues". *Imperial College*, London (2003).
- [5] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Singapore, (2004).
- [6] Karaboga, D., "An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, (2005).
- [7] Tereshko V., "Reaction-diffusion model of a honey bee colony's foraging behaviour", *Lecture Notes in Computer Science*, vol 1917, Springer-Verlag: Berlin, (2000) 807-816..