

REKONFIGURASI OPTIMAL SISTEM DISTRIBUSI YANG TERINTEGRASI PEMBANGKIT TERSEBAR TERBARUKAN MENGGUNAKAN ALGORITMA HARMONY SEARCH

Jamal Darusalam Giu

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik

Universitas Negeri Gorontalo

Jl. Jenderal Sudirman No.6 Kota Gorontalo 96128

Email : jamaldarusalam@ung.ac.id

ABSTRACT

This research investigates the problem about re-configuring feeders of electrical distribution system, while several renewable distributed generators are connected to the medium voltage network. Reconfiguration should be done when renewable distributed generators such as wind turbines, photovoltaic cells or mini hydro directly connected to the grid. Those connections can affect the power flows and the voltage level on busses near the generators. Harmony Search Algorithm (HSA) is proposed to solve the network re-configuration problem to get optimal switching combination in the network. It uses a stochastic random search instead of a gradient search which eliminates the need for derivative information. Simulations are carried out on 33-bus radial network of IEEE test system and engaged with an analysis of power flow method called BIBC-BCBV (Bus Injection to Branch Current – Branch Current to Bus Voltage). The PSO (Particle Swarm Optimization) method is used to determine the value of reactive power injected by generator while operating in PV-bus mode. The simulations can obtain not only the new optimal configurations very fast but also the evidences that objectively proving the power losses resulted by those new configurations is minimum.

Keywords: optimization, feeder, stochastic, bibt-bcbv, PSO

INTISARI

Penelitian ini menyelidiki masalah konfigurasi ulang penyulang distribusi listrik ketika terdapat pembangkit tersebar terbarukan yang dihubungkan ke jaring tegangan menengah. Rekonfigurasi dilakukan karena sejumlah pembangkit terbarukan seperti turbin angin, sel surya, atau mini hidro dihubungkan langsung pada grid. Koneksi tersebut mengakibatkan aliran daya dan level tegangan pada bus-bus di dekat pembangkit terpengaruh. *Harmony Search Algorithm* (HSA) digunakan untuk penyelesaian masalah rekonfigurasi yang bersifat kombinatorial. Algoritma ini memakai pendekatan stokastik sehingga lebih singkat daripada metode *gradient search* karena tidak membutuhkan data turunan. Simulasi diterapkan pada sistem radial IEEE 33-bus memakai metode analisis aliran daya BIBC-BCBV (*Bus Injection to Branch Current–Branch Current to Bus Voltage*). Metode PSO (*Particle Swarm Optimization*) digunakan untuk menentukan injeksi daya reaktif generator saat beroperasi sebagai PV-bus. Hasil simulasi dapat menemukan konfigurasi optimal dalam waktu singkat sekaligus membuktikan secara obyektif bahwa kehilangan daya (*losses*) yang dihasilkan oleh konfigurasi jaring yang baru adalah minimum.

Kata Kunci: optimisasi, penyulang, stokastik, bibt-bcbv, PSO

PENDAHULUAN

Pembangkit tersebar terbarukan yang dihubungkan ke grid dan konsep *smart grid* telah menuntut penyesuaian jaring distribusi tradisional yang bersifat pasif menjadi jaring distribusi aktif. Konsekuensi dari penyesuaian tersebut adalah modifikasi susunan penyulang-penyulang yang telah ada sehingga dapat beroperasi optimum ketika pembangkit tersebut berlaku sebagai bus penyuplai daya aktif-reaktif (PQ bus) ataupun sebagai bus pengatur tegangan (PV bus).

Berbeda dengan sistem distribusi pasif, sistem distribusi aktif memiliki karakteristik

permasalahan kompleks, yaitu peningkatan tegangan pada ujung-terima sebuah penyulang, ketidak-seimbangan suplai arus ketika penyulang tertentu pada kondisi gangguan, penurunan kualitas daya, dan distorsi tegangan yang dirasakan konsumen. Selain masalah tersebut, manfaat sistem distribusi aktif antara lain menaikkan tegangan pada bus-bus yang jauh dari gardu induk, menekan kehilangan daya distribusi, serta mengakomodir pembangkit skala kecil.

Sistem distribusi radial memiliki sejumlah penyulang yang saling terhubung ujung-

ujungnya melalui *circuit breaker* (disingkat: CB) yang bisa terbuka atau tertutup. Konfigurasi dari struktur radial yang mungkin diterapkan melalui buka-tutup CB tersebut adalah angka kombinatorial yang sangat bervariasi. Secara matematis sederhana, total kombinasi adalah sebanyak 2^n . " n " adalah jumlah kabel (*line*) yang dipisahkan oleh semua CB yang ada (Gonzales, 2012).

Ketika di lapangan, operator menentukan sendiri konfigurasi penyulang berdasarkan pengalaman dan pengetahuan teknis yang mereka miliki. Kelemahan metode tersebut adalah tidak mudah dipastikan secara obyektif bahwa struktur dari penyulang yang mereka pilih sudah optimal atau belum. Hal ini karena ada dua pilihan kondisi CB (terbuka atau tertutup) yang dapat diterapkan untuk setiap penyulang yang saling terhubung. Sebagai contoh, sebuah sistem dengan 32 kabel penyulang yang saling terhubung akan menghasilkan kandidat konfigurasi yang mungkin sebanyak 2^{32} (=4,294,967,296 konfigurasi). Dengan kata lain, penentuan sebuah struktur sistem radial yang paling optimal menjadi masalah optimisasi kombinatorial yang akan dipilih dari kandidat solusi yang sangat banyak jumlahnya.

Saat ini beberapa metode telah diajukan oleh para peneliti untuk mendapatkan konfigurasi optimal dari jaring distribusi radial. Rekonfigurasi penyulang untuk mengurangi kehilangan daya pertama kali diperkenalkan oleh Merlin dan Back (1975). Mereka menggabungkan teknik optimisasi konvensional dengan metode heuristik untuk menentukan konfigurasi jaring distribusi radial yang memberikan kehilangan daya minimal pada kondisi beban tertentu. Algoritma yang mereka bangun dapat menemukan solusi optimal yang dipengaruhi oleh status switching dari penyulang. Kelemahan algoritma tersebut adalah: 1) hanya mempertimbangkan komponen arus aktif ketika menghitung kehilangan daya dan mengabaikan nilai sudut tegangan; 2) kehilangan daya pada kabel dan perangkat lain tidak diperhitungkan; dan 3) solusi optimal ditemukan dalam waktu yang cukup lama.

Algoritma heuristik tipe *branch and bound* diusulkan oleh Civanlar dan kawan-kawan (1998). Formula sederhana yang dikembangkan untuk menentukan perubahan kehilangan daya melalui pertukaran cabang-cabang penyulang. Kelebihan algoritma ini adalah kecepatan dalam menentukan konfigurasi *switch* yang menghasilkan kehilangan daya paling rendah dan pengurangan jumlah kombinasi *switching*. Kelemahan yang ada yaitu: 1) hanya dapat menentukan satu

pasang saklar penyulang yang beroperasi pada waktu tertentu dan 2) rekonfigurasi sistem bergantung pada status awal (*initial status*) dari saklar penyulang. Shirmohammadi dan Hong (1989) memodelkan jaring semi tertutup (*weakly meshed*) dengan akurat menggunakan sebuah teknik kompensasi berbasis aliran daya. Kelemahan dari model tersebut adalah strategi pencarian yang kurang efisien dan memakan waktu serta tidak dapat mengakomodir sistem distribusi multifasa tidak seimbang.

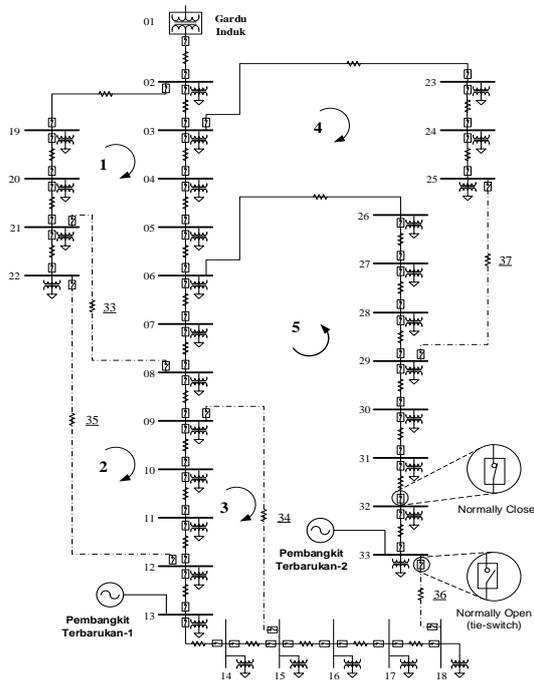
Penelitian tentang topik rekonfigurasi di lingkup nasional telah dilakukan oleh Rodhi Faiz (2003) dengan tujuan pemulihan pelayanan saat gangguan dan Cokorde (2007) untuk meminimasi hilang daya total menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA). Kemudian topik ini dikembangkan oleh Eddon Mufrizon (2008) dengan fungsi tujuan meminimasi *losses* sekaligus memperbaiki profil tegangan sistem dan oleh Julianus (2008) yang mempertimbangkan harmonisa pada jaring distribusi menggunakan metode *Ant Colony Optimization* (ACO). Terakhir pada tahun 2011, Stephan (2011) menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk rekonfigurasi jaring distribusi dalam rangka pemulihan pelayanan ketika gangguan dan meminimasi kehilangan daya distribusi.

Metode optimisasi *Harmony Search Algorithm* (HSA) diajukan penulis untuk meminimalkan kehilangan daya pada sistem distribusi yang terpasang unit pembangkit tersebar terbarukan (misal: photovoltaic, turbin angin). Metode ini akan disimulasikan pada jaring radial 33-bus (IEEE *test system*) yang merupakan standar internasional (Baran, 1989).

Penelitian ini menggunakan sebuah jaring radial 33-bus, 12,66 kV seperti ditunjukkan pada Gambar. 1. Sistem ini terdiri dari 5 *tie-lines* (normally open) dan 32 saklar pemisah (normally close). *Tie-lines* adalah saluran 33 sampai 37 sedangkan saklar pemisah terdapat pada saluran 1 sampai 32. Total permintaan daya aktif dari beban pada sistem adalah 3715 kW serta total permintaan daya reaktif oleh beban sebesar 2300 kVAr. Kehilangan daya distribusi sebelum rekonfigurasi sebesar 201,6 kW dan magnitudo tegangan paling rendah terjadi di bus 18 sebesar 0,9131 p.u. Data-data jaring dan besar beban pada setiap bus dapat dilihat pada Tabel I dan Tabel II.

Pembangkit tersebar terbarukan selanjutnya akan kita sebut DG (*Distributed Generator*). DG yang digunakan adalah Turbin Minihidro yang menggerakkan generator sinkron dan Sel Surya (*photovoltaic*) yang ber-

basis inverter (Moghaddas, 2009). Spesifikasi lengkap DG diberikan pada Tabel III.



Gambar. 1. Diagram Satu Garis Penyulang Distribusi 33-Bus

Gambar. 2 menunjukkan tahap-tahap penelitian dari awal hingga akhir.

Langkah 1: Memodelkan DG yang terhubung ke sistem distribusi. Koneksi DG ke grid ditentukan oleh: 1) perangkat *power electronics* dan/atau 2) mesin sinkron atau asinkron yang digunakan sehingga DG dapat dimodelkan sebagai PV-bus (bus yang diketahui daya aktif dan tegangannya) atau PQ-bus (bus yang diketahui daya aktif dan daya reaktifnya).

Langkah 2: Memasukkan data sistem distribusi yaitu resistansi (R), reaktansi (X), koneksi feeder, tegangan (kV), dan beban di tiap bus (kW dan kVar).

Langkah 3: Menentukan fungsi obyektif (minimal *losses* atau memperbaiki profil tegangan bus-bus beban). Batas-batas yang dimasukkan adalah arus maksimum pada setiap penyulang, rentang nilai tegangan bus yang diizinkan (0,9 pu – 1,1 pu) dan *radiality constrain*.

Langkah 4: Dilakukan penyusunan matriks *bus incidence* dan penentuan variabel keputusan yang akan dioptimisasi. Pemilihan nilai HMCR, PAR dan jumlah iterasi sangat menentukan performa keseluruhan dari algoritma yang diajukan.

Langkah 5: Kehilangan daya (P_{loss}) sebelum rekonfigurasi dihitung dan matriks *Harmony Memory* (HM) dibentuk untuk menampung

Tabel 1 Data Penyulang Distribusi 33-Bus

Nomor Saluran	Bus Pengirim	Bus Penerima	Resistansi R (ohm)	Reaktansi X (ohm)
1	1	2	0,0922	0,0470
2	2	3	0,4930	0,2511
3	3	4	0,3660	0,1864
4	4	5	0,3811	0,1941
5	5	6	0,8190	0,7070
6	6	7	0,1872	0,6188
7	7	8	0,7144	0,2351
8	8	9	1,0300	0,7400
9	9	10	1,0440	0,7400
10	10	11	0,1966	0,0650
11	11	12	0,3744	0,1238
12	12	13	1,4680	1,1550
13	13	14	0,5416	0,7129
14	14	15	0,5910	0,5260
15	15	16	0,7463	0,5450
16	16	17	1,2890	1,7210
17	17	18	0,7320	0,5740
18	2	19	0,1640	0,1565
19	19	20	1,5042	1,3554
20	20	21	0,4095	0,4784
21	21	22	0,7089	0,9373
22	3	23	0,4512	0,3083
23	23	24	0,8980	0,7091
24	24	25	0,8960	0,7011
25	6	26	0,2030	0,1034
26	26	27	0,2842	0,1447
27	27	28	1,0590	0,9337
28	28	29	0,8042	0,7006
29	29	30	0,5075	0,2585
30	30	31	0,9744	0,9630
31	31	32	0,3105	0,3619
32	32	33	0,3410	0,5302
33	8	21	2,0000	2,0000
34	9	15	2,0000	2,0000
35	12	22	2,0000	2,0000
36	18	33	0,5000	0,5000
37	25	29	0,5000	0,5000

Tabel 2 Data Beban Sistem Distribusi 33-Bus

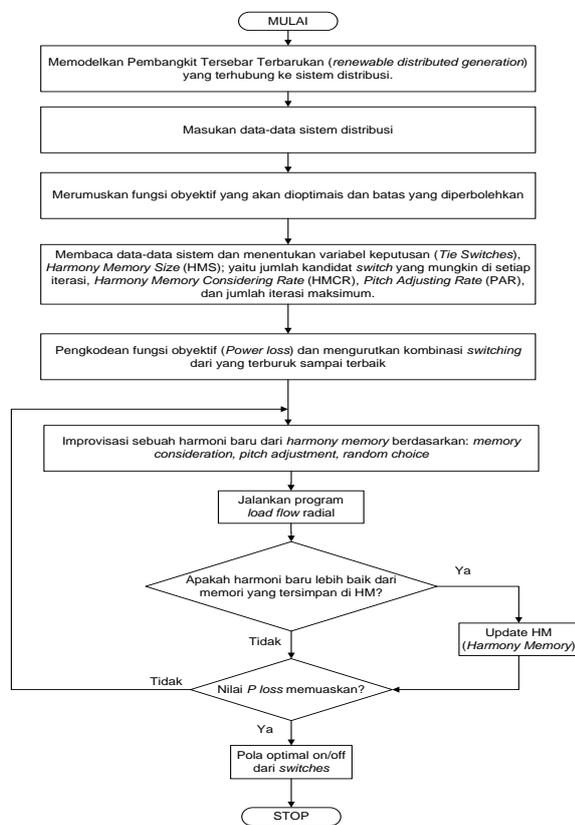
Bus	kVA	Bus	kVA
2	100	18	90
3	90	19	90
4	120	20	90
5	60	21	90
6	60	22	90
7	200	23	90
8	200	24	420
9	60	25	420
10	60	26	60
11	45	27	60
12	60	28	60
13	60	29	120
14	120	30	200
15	60	31	150
16	60	32	210
17	60	33	60

variabel keputusan (dalam hal ini adalah pemutus-pemutus yang akan dibuka atau ditutup).

Langkah 6: Improvisasi sebuah harmoni atau sebuah vektor solusi dibangkitkan berdasar pada seting parameter berikut: HM *consideration* (HMCR), *pitch adjusting rate* (PAR) atau mengambil random (x_i) di luar nilai pada HM.

Tabel 3 Spesifikasi pembangkit tersebar energi terbarukan

SPESIFIKASI	DG-1	DG-2
Tipe	Minihidro	Sel Surya
Mesin listrik	Generator Sinkron	-
Perangkat penghubung	Terhubung langsung	Inverter
Daya mampu	1400 kVA	1400 kVA
Output daya aktif	900 kW	800 kW
Faktor daya	$\text{Cos } \phi = 0,85$	$\text{Cos } \phi = 0,75$
Maksimum daya reaktif	900 kVAr	1100 kVAr
Mode operasi	PQ dan PV (mampu mengatur tegangan eksitasi pada generator sinkron)	PQ dan PV (rangkain kontrol pada konverter mampu mengatur P, Q, dan V secara independen)
Frekuensi	50 Hz	
Tegangan Sistem	12,66 kV 3 fasa	



Gambar. 2. Diagram Alir Penelitian

Langkah 7: Dari harmoni baru yang dibangkitkan, dilakukan *running* program *power flow* jaring distribusi pada kombinasi *open switches* yang baru untuk mendapatkan P_{loss_new} .

Langkah 8: P_{loss_new} dibandingkan dengan nilai terburuk (f_{worst}) yang tersimpan di HM. Jika lebih baik (lebih minimal kehilangan dayanya) maka kombinasi *open switches* yang baru ini menggantikan kombinasi yang buruk tersebut di HM.

4 Giu, Rekonfigurasi Optimal Sistem Distribusi yang Terintegrasi Pembangkit Tersebar Terbarukan Menggunakan Algoritma *Harmony Search*

Langkah 9: Cek kriteria penghentian iterasi. Jika kriteria belum dipenuhi maka kembali ke langkah 6. Kriteria penghentian menggunakan jumlah iterasi maksimum.

Langkah 10: Output algoritma ini adalah pola optimum dari *open-close* penyulang pada sistem yang menghasilkan kehilangan daya daya minimum.

A. Diagram Alir Analisis Power Flow Sistem

Distribusi Radial

Berikut ini adalah rumus-rumus perhitungan aliran daya pada sistem distribusi radial menggunakan metode BIBC-BCBV:

Langkah 1: Membaca data sistem distribusi yang meliputi data saluran (kabel) dan data beban di setiap bus.

Langkah 2: Membentuk matriks BIBC. Matriks tersebut akan membentuk Pers. 1, yakni:

$$[B] = [BIBC] [I] \quad (1)$$

Langkah 3: Membentuk matriks BCBV. Matriks tersebut akan membentuk Pers. 2, yakni:

$$[\Delta V] = [BCBV] [B] \quad (2)$$

Langkah 4: Membentuk matriks DLF, yakni :

$$[DLF] = [BCBV] [BIBC] \quad (3)$$

$$[\Delta V] = [DLF] [I] \quad (4)$$

Langkah 5: Atur iterasi, $k = 0$

Langkah 6: Iterasi $k = k + 1$

Langkah 7: Perbarui tegangan menggunakan Pers. 5 dan Pers. 6 yakni:

$$[\Delta V_{k+1}] = [DLF] [I_k] \quad (5)$$

$$[V_{k+1}] = [V_0] + [\Delta V_{k+1}] \quad (6)$$

Langkah 8: Jika nilai maksimum dari $(|I_i^{k+1}| - |I_i^k|) > 0,0001$, maka kembali ke langkah 6.

Langkah 9: Hitung nilai arus yang mengalir pada saluran dan hilang daya (*losses*) pada saluran berdasarkan nilai tegangan hasil iterasi.

Langkah 10: Cetak tegangan bus, arus saluran dan *losses* pada saluran.

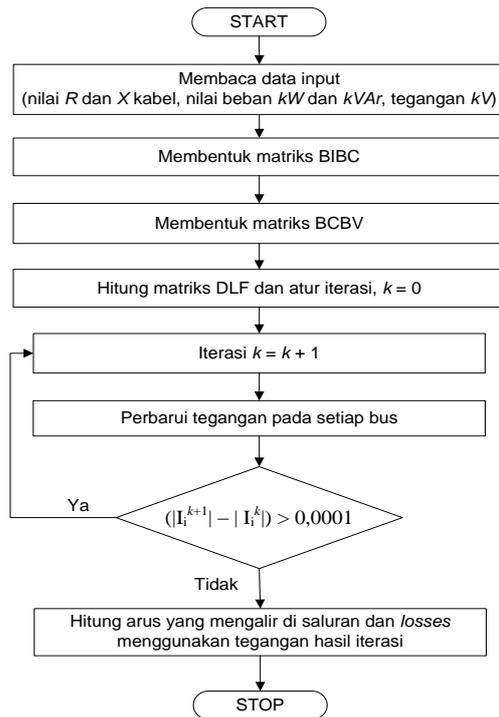
Langkah 11: Stop

Gambar. 3 menunjukkan tahap-tahap penggunaan metode BIBC-BCBV.

B. Penggunaan PSO Sebagai Metode untuk

Mengakomodir PV-bus

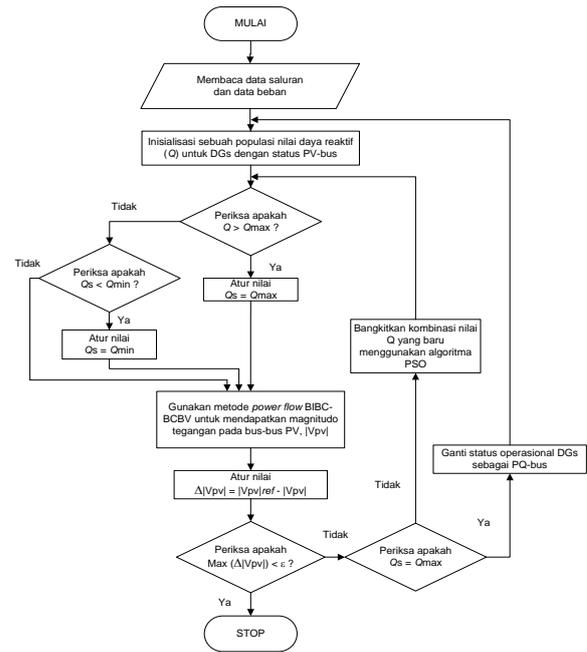
Particle Swarm Optimization digunakan untuk mengoptimasi nilai daya reaktif (Q_{PV}) yang diperlukan oleh DG yang dimodelkan sebagai PV-bus saat magnitudo tegangan ($|V_{PV}|$) dijaga tetap berada pada *set point* tertentu (Al-Rashidi, 2009).



Gambar. 3. Diagram Alir Perhitungan Power Flow untuk Sistem Distribusi

Gambar. 4 adalah diagram alir dari metode BIBC-BCBV + PSO dengan tujuan mengintegrasikan sumber *DG* sebagai PV-bus ke dalam analisis aliran daya sistem distribusi radial. Secara lengkap tahapan-tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Baca data (data beban dan data jaringan).
2. Inisialisasi populasi dari Q_{pv} pada setiap PV-bus sesuai dengan jumlah DG yang ada dan berapa banyak partikel (*swarm*) yang dipakai untuk optimasi.
3. Cek Q_{pv} untuk memastikan bahwa Q_{pv} berada pada batas yang diijinkan ($Q \geq Q_{min}$ dan $Q \leq Q_{max}$). Jika Q_{pv} lebih besar dari Q_{max} , maka Q_{pv} harus diatur sama dengan Q_{max} , demikian sebaliknya jika Q_{pv} kurang dari Q_{min} , maka Q_{pv} harus diatur sama dengan Q_{min} . Catatan: hanya Q_{pv} yang berada di dalam batas yang diijinkan untuk menuju ke proses selanjutnya.
4. Jalankan perhitungan aliran daya metode BIBC-BCBV untuk mendapatkan nilai tegangan pada setiap bus.
5. Khusus untuk PV-bus, nilai $|V_{pv}|$ yang dihasilkan dari *power flow* BIBC-BCBV dengan mengacu pada nilai Q_{pv} dibandingkan dengan $|V_{pv}|$ *setpoint* yang bertujuan untuk mendapatkan $\Delta|V_{pv}|$. Jika $\Delta|V_{pv}|$ kurang dari toleransi berarti nilai Q_{pv}



Gambar. 4 Diagram Alir Metode BIBC-BCBV yang Dioptimasi PSO (Syai'in, 2012)

yang diinginkan telah didapat. Namun jika $\Delta|V_{pv}|$ lebih besar dari toleransi maka Q_{pv} harus di-update menggunakan PSO untuk mendapatkan nilai Q_{pv} yang baru.

6. Perlu dicatat: jika $\Delta|V_{pv}|$ lebih besar dari toleransi, tetapi nilai Q_{pv} sudah berada pada batas maksimum-minimum itu berarti Q_{pv} DG tersebut tidak mencukupi untuk mempertahankan $|V_{pv}|$ pada setpoint. Pada kondisi ini status DG tersebut harus diubah dari PV-bus menjadi PQ-bus dan nilai Q diset maksimum.

PEMBAHASAN

Sistem radial yang digunakan adalah sistem IEEE 33-bus dengan 3 jaring lateral, 32 saluran berupa kabel dan saklar pemisah (*normally close*) serta 5 saluran *tie-lines* (*normally open*) seperti terlihat pada Gambar. 1. Data lengkap tentang impedansi saluran dan beban pada setiap bus telah tersaji pada Tabel I dan Tabel II. Kapasitas hantar arus untuk setiap kabel pada saluran nomor 1 sampai 9 sebesar 400 A, saluran nomor 22-24 dan 25-32 sebesar 300 A dan saluran yang lain termasuk *tie-lines* sebesar 200 A.

Kontribusi daya total dari dua DG sebesar 1700 kW atau sebesar 45,8 % dari total permintaan beban sistem yang berjumlah 3715 kW. Basis nilai untuk tegangan dan daya adalah 12,66 kV dan 100 MVA. Batas minimum dan maksimum tegangan bus berada pada rentang 0,95 dan 1,05 p.u. Setiap

saluran (kabel) pada sistem memiliki saklar pemutus berupa *circuit breaker* untuk keperluan rekonfigurasi.

Kasus 1: Sistem distribusi 33-bus belum direkonfigurasi (*base case*).

Analisis aliran daya sistem 33-bus pada kondisi dasar (*base case*) dapat dilihat pada Tabel IV dengan total kehilangan daya sistem sebesar 201,6 kW dan tegangan minimum terjadi di bus-18 sebesar 0,9131 per unit. Profil tegangan pada setiap bus ditunjukkan Gambar. 5.

Dari Gambar. 5 terlihat bahwa ada 22 bus yang berada di bawah standar minimum (0,95 p.u.) yakni bus 6 sampai 18 dan bus 26 sampai 33. Ini berarti sebagian besar bus pada kondisi *under voltage* sehingga mempengaruhi kualitas pelayanan listrik kepada konsumen yang berada di bus-bus tersebut. Tegangan rata-rata sebesar 0,9485.

Kasus 2: Sama seperti Kasus 1 dan Kedua DG dihubungkan sebagai PQ-bus.

Kasus kedua adalah penetrasi daya dua DG yang dihubungkan pada jaring distribusi. Dalam analisis aliran daya, kedua pembangkit tersebut diatur sebagai PQ- bus yang berarti

faktor daya pembangkit saat beroperasi dipertahankan pada nilai tertentu sehingga daya reaktif yang dibangkitkan menyesuaikan nilai daya aktif (kW) dan faktor daya ($\cos \phi$) generator saat beroperasi. Pada simulasi ini generator diatur pada kondisi operasi sekitar ¾ dari daya mampu generator dengan faktor daya sebesar 0,85 untuk DG-1 dan 0,75 untuk DG-2 serta kondisi jaring distribusi belum dilakukan rekonfigurasi. Jumlah total daya aktif yang disuplai oleh kedua DG sebesar 1700 kW atau 45,8% dari kebutuhan beban penyulang.

Hasil analisis aliran daya sistem 33-bus untuk kasus kedua dapat dilihat pada Tabel V dengan total kehilangan daya pada sistem sebesar 39 kW atau mengalami penurunan total kehilangan daya lebih rendah 80,6 % daripada kasus 1 (*base case*). Tegangan rata-rata pada kondisi kasus 2 sebesar 0,9911.

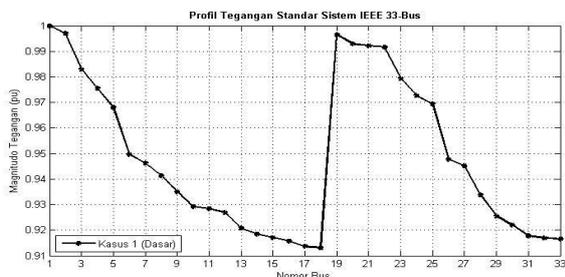
Dari Tabel V terlihat bahwa tegangan minimum terjadi di bus-25 sebesar 0,9788 per unit. Ini berarti semua bus yang berstatus *under voltage* pada kasus 1 menjadi normal tegangannya. Perbandingan profil tegangan pada setiap bus untuk kasus 1 dan kasus 2 ditunjukkan Gambar. 6.

Tabel 4 Tegangan Sistem 33-Bus Tanpa Penetrasi DG (*Base Case*)

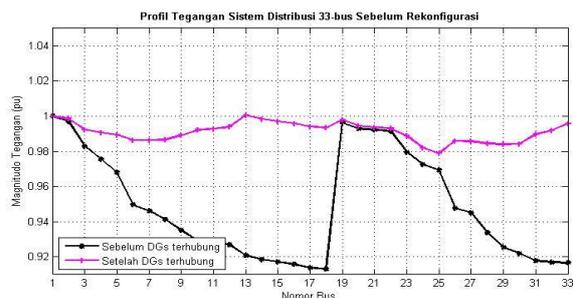
No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)	No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)
1	1,000	0,00	18	0,9131	-0,4944
2	0,9970	0,0145	19	0,9965	0,0036
3	0,9829	0,0960	20	0,9929	-0,0633
4	0,9755	0,1616	21	0,9922	-0,0827
5	0,9681	0,2282	22	0,9916	-0,1030
6	0,9497	0,1338	23	0,9794	0,0650
7	0,9462	-0,0964	24	0,9727	-0,0237
8	0,9413	-0,0599	25	0,9694	-0,0674
9	0,9351	-0,1329	26	0,9477	0,1732
10	0,9293	-0,1955	27	0,9452	0,2294
11	0,9284	-0,1882	28	0,9338	0,3123
12	0,9269	-0,1767	29	0,9255	0,3902
13	0,9208	-0,2680	30	0,9220	0,4954
14	0,9185	-0,3466	31	0,9178	0,4111
15	0,9171	-0,3843	32	0,9169	0,3880
16	0,9157	-0,4076	33	0,9166	0,3803
17	0,9137	-0,4848			

Tabel 5 Tegangan Sistem 33-Bus Untuk Kasus 2

No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)	No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)
1	1,0000	0	18	0,9935	-0,4944
2	0,9985	0,0145	19	0,9980	0,0036
3	0,9923	0,0960	20	0,9944	-0,0633
4	0,9906	0,1616	21	0,9937	-0,0827
5	0,9893	0,2282	22	0,9931	-0,1030
6	0,9863	0,1338	23	0,9887	0,0650
7	0,9863	-0,0964	24	0,9821	-0,0237
8	0,9866	-0,0599	25	0,9788	-0,0674
9	0,9891	-0,1329	26	0,9860	0,1732
10	0,9922	-0,1955	27	0,9857	0,2294
11	0,9927	-0,1882	28	0,9844	0,3123
12	0,9939	-0,1767	29	0,9839	0,3902
13	1,0005	-0,2680	30	0,9843	0,4954
14	0,9984	-0,3466	31	0,9896	0,4111
15	0,9971	-0,3843	32	0,9919	0,3880
16	0,9959	-0,4076	33	0,9957	0,3803
17	0,9940	-0,4848			



Gambar. 5. Profil Tegangan Sistem IEEE 33-bus Pada Kondisi *Base Case*



Gambar. 6. Perbandingan Profil Tegangan Untuk Kasus 1 dan Kasus 2

Dari Gambar. 6 terlihat bahwa dengan dua pembangkit tersebar terhubung ke bus-13 dan bus-33 maka profil tegangan dari penyulang tersebut membaik. Hal demikian terjadi akibat injeksi daya aktif total kedua pembangkit sebesar 1.700 kW dengan faktor daya masing-masing sebesar 0,8 dan 0,75 membuat penyulang menerima injeksi daya reaktif sebesar total 1.283 kVAr atau 55 % dari total permintaan daya reaktif sistem.

Kasus 3: Kedua DG terpasang sebagai PQ-Bus dan dilakukan rekonfigurasi

Kasus ketiga menggunakan kondisi pembangkit tersebar yang sama dengan kasus 2. Kedua pembangkit tersebar beroperasi sekitar $\frac{3}{4}$ dari daya mampu generator dengan faktor daya sebesar 0,85 untuk DG-1 dan 0,75 untuk DG-2 dengan suplai total daya aktif sebesar 1700 kW dan keduanya terhubung dengan status PQ-bus. Kemudian dilakukan rekonfigurasi pada penyulang untuk memperoleh nilai kehilangan daya yang lebih optimal sekaligus mendapatkan profil tegangan yang lebih baik.

Hasil analisis aliran daya sistem 33-bus untuk kasus ketiga dapat dilihat pada Tabel VI dengan total kehilangan daya pada sistem sebesar 36,1 kW atau mengalami penurunan

total kehilangan daya lebih rendah 82,1 % daripada kasus 1 (*base case*). Jika dibandingkan dengan kerugian daya sebelum direkonfigurasi maka terjadi penurunan sebesar 2,9 kW atau sekitar 7,4 % sehingga dengan kata lain proses rekonfigurasi memberikan penurunan kehilangan daya pada jaring distribusi.

Dari Tabel VI terlihat bahwa tegangan minimum terjadi di bus-30 sebesar 0,9799 per unit. Sebagian besar bus-bus pada penyulang mengalami kenaikan nilai tegangan dibandingkan sebelum rekonfigurasi. Perbandingan profil tegangan pada setiap bus untuk kasus 1, kasus 2 dan kasus 3 ditunjukkan Gambar. 7. Tegangan rata-rata pada kondisi kasus 3 sebesar 0,993.

Dari Gambar. 7 terlihat bahwa ketika penyulang direkonfigurasi magnitudo tegangan mengalami peningkatan dan cenderung homogen. Perbaikan tegangan pada penyulang disebabkan daya reaktif yang disuplai dari DG yang dapat menjangkau hingga ke bus-bus yang paling jauh dari gardu induk.

Algoritma HSA dalam waktu kurang dari 5 detik menemukan bahwa kondisi di atas dicapai dengan membuka saluran nomor 6, 8, 16, 27 dan 34 serta menutup saluran *tie-switch* nomor 33, 35, 36, dan 37.

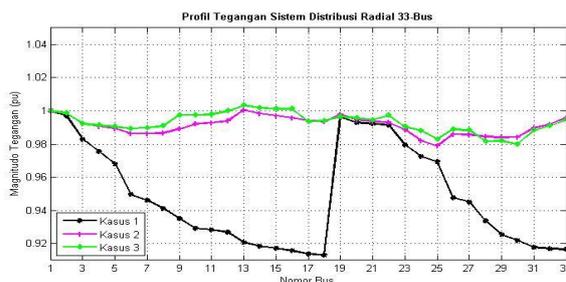
Kasus 4: DG-1 terpasang sebagai PQ-bus sedangkan DG-2 terpasang sebagai PV-bus dan dilakukan rekonfigurasi

Kasus keempat menggunakan kondisi pembangkit tersebar yang berbeda dengan kasus 3. DG-1 yang berada di bus-13 diatur sebagai PQ-bus. DG-1 beroperasi $\frac{3}{4}$ dari daya mampu generator dengan daya aktif sebesar 900 kW dan faktor daya 0,85. DG-2 yang terpasang di bus-33 diatur sebagai PV-bus. DG-2 juga dapat beroperasi hingga *full load* dengan daya mampu sebesar 1200 kW dan nilai tegangan pada bus-33 dipertahankan pada 1 per unit dengan menyesuaikan besaran injeksi daya reaktif dari DG-2 menuju bus-33. Kemudian dilakukan rekonfigurasi pada penyulang dimaksud untuk memperoleh nilai kehilangan daya yang lebih optimal dan profil tegangan bus yang lebih baik.

Analisis aliran daya sistem 33-bus untuk kasus keempat dapat dilihat pada Tabel VII dengan total kehilangan daya sistem sebesar 38,8 kW atau mengalami penurunan lebih rendah 80,75 % daripada kasus 1 (*base case*). Jika dibandingkan dengan total kehilangan daya pada kasus 3 yang kedua DG diatur pada status PQ-bus maka terjadi sedikit kenaikan sebesar 2,7 kW (kasus 3 sebesar 36,1 kW) yang berarti rekonfigurasi pada

Tabel 6 Tegangan Sistem 33-Bus Untuk Kasus 3

No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)	No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)
1	1,0000	0	18	0,9941	-0,0049
2	0,9985	0,0006	19	0,9964	-0,1166
3	0,9922	0,0272	20	0,9955	-0,1472
4	0,9912	0,0268	21	0,9945	-0,2086
5	0,9905	0,0237	22	0,9972	-0,2228
6	0,9893	-0,0018	23	0,9904	0,0390
7	0,9898	-0,2313	24	0,9880	0,0551
8	0,9909	-0,2402	25	0,9830	0,0429
9	0,9974	-0,2184	26	0,9888	-0,0038
10	0,9975	-0,2184	27	0,9883	-0,0161
11	0,9978	-0,2185	28	0,9816	0,0394
12	0,9998	-0,1870	29	0,9817	0,0451
13	1,0034	-0,1615	30	0,9799	0,1897
14	1,0019	-0,1788	31	0,9882	0,0379
15	1,0012	-0,1955	32	0,9909	0,0150
16	1,0011	-0,1977	33	0,9947	0,0122
17	0,9934	-0,0234			

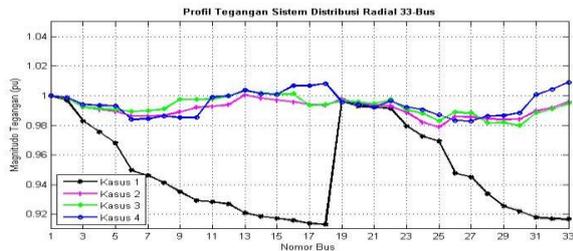


Gambar. 7. Perbandingan Profil Tegangan Untuk Kasus 1, Kasus 2, dan Kasus 3

kasus 3 berdampak sedikit lebih baik daripada kasus 4.

Tabel 7 Tegangan Sistem 33-Bus Untuk Kasus 4

No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)	No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)
1	1,0000	0	18	1,0082	0,3854
2	0,9987	0,0026	19	0,9957	-0,1429
3	0,9940	0,0416	20	0,9944	-0,1787
4	0,9934	0,0441	21	0,9924	-0,2547
5	0,9932	0,0440	22	0,9964	-0,2426
6	0,9839	-0,3517	23	0,9925	0,0569
7	0,9844	-0,3154	24	0,9905	0,0779
8	0,9863	-0,3273	25	0,9871	0,1051
9	0,9854	-0,3446	26	0,9834	-0,3538
10	0,9852	-0,3445	27	0,9829	-0,3661
11	0,9992	-0,1751	28	0,9864	0,1383
12	0,9999	-0,1723	29	0,9866	0,1440
13	1,0037	-0,1397	30	0,9886	0,4065
14	1,0013	-0,2086	31	1,0006	0,3763
15	1,0010	-0,2183	32	1,0043	0,3831
16	1,0067	0,3473	33	1,0090	0,4092
17	1,0068	0,3494			



Gambar. 8 Perbandingan Profil Tegangan Untuk Kasus 1 Hingga Kasus 4

Dari Tabel VII terlihat bahwa tegangan minimum terjadi di bus-27 sebesar 0,9829 per unit. Perbandingan profil tegangan pada setiap bus untuk kasus 1 sampai dengan kasus 4 ditunjukkan Gambar. 8.

Dari Gambar. 8 terlihat bahwa ketika penyulang direkonfigurasi magnitudo tegangan mengalami peningkatan dan cenderung homogen sama seperti pada kasus 3. Tegangan rata-rata pada kondisi kasus 4 sebesar 0,9946. Nilai total kehilangan daya penyulang untuk kasus 4 (sebesar 38,8 kW) sedikit lebih buruk daripada kasus 3 (sebesar 36,1 kW). Meski demikian perlu diketahui bahwa pada kasus 3 kedua DG beroperasi pada pembebanan nominal sedangkan pada kasus 4, DG-2 yang beroperasi sebagai PV-bus berusaha menjaga tegangan bus pada nilai 1 p.u. sehingga menambah injeksi daya reaktif. Besar kontribusi daya aktif dan reaktif kedua DG dapat dilihat pada Tabel VIII.

Tabel 8 Perbandingan Kontribusi Daya Kedua DG Pada Kasus 3 dan Kasus 4

Generator	Kasus 3			Kasus 4			No. Bus
	kW	kVAr	cos φ	kW	kVAr	-	
DG-1	900	578	0,85	900	578	cos φ = 0,85	13
DG-2	800	705	0,75	1100	801	V ₃₃ = 1 p.u.	33

Kasus 5: Kedua DG terpasang sebagai PV-Bus dan dilakukan rekonfigurasi

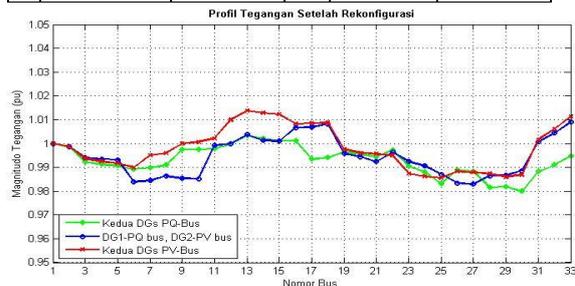
Kasus kelima menggunakan kondisi pembangkit tersebar yang berjenis sama, seperti pada kasus 3. Kedua DG diatur sebagai PV-bus dan beroperasi ¾ dari daya mampu generator. dengan daya aktif sebesar 900 kW dan faktor daya 0,85 dengan daya aktif total sebesar 1000 kW. Nilai tegangan pada bus-13 dan bus-33 tempat kedua DG terpasang dipertahankan magnitudo tegangannya pada nilai 1 per unit dengan menyesuaikan besaran injeksi daya reaktif dari masing-masing DG ke penyulang. Kemudian dilakukan rekonfigurasi pada penyulang untuk memperoleh nilai kehilangan daya yang lebih optimal sekaligus mendapatkan profil tegangan yang lebih baik.

Analisis aliran daya sistem 33-bus untuk kasus kelima dapat dilihat pada Tabel IX dengan total kehilangan daya sistem sebesar 43,3 kW atau ada penurunan total kehilangan daya lebih rendah 78,5 % daripada kasus 1.

Jika dibandingkan dengan kasus 3 yang kedua DG diatur pada status PQ-bus maka terjadi kenaikan sebesar 7,2 kW (kasus 3 sebesar 36,1 kW). Tegangan rata-rata pada kondisi ini sebesar 0,998 per unit.

Tabel 9 Tegangan Sistem 33-Bus Untuk Kasus 5

No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)	No. Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (derajat)
1	1,0000	0	18	1,0087	-0,3228
2	0,9987	-0,0024	19	0,9976	-0,0440
3	0,9937	-0,0059	20	0,9961	-0,1039
4	0,9925	-0,0077	21	0,9956	-0,1220
5	0,9916	-0,0122	22	0,9949	-0,1320
6	0,9899	-0,0472	23	0,9873	-0,0775
7	0,9950	-0,1258	24	0,9862	-0,0780
8	0,9960	-0,1346	25	0,9855	-0,0771
9	1,0000	-0,1162	26	0,9883	-0,0815
10	1,0007	-0,1241	27	0,9879	-0,0845
11	1,0022	-0,1391	28	0,9874	-0,0985
12	1,0099	-0,0650	29	0,9859	-0,0646
13	1,0137	0,0302	30	0,9868	-0,0299
14	1,0128	0,0157	31	1,0016	-0,2200
15	1,0122	-0,0158	32	1,0060	-0,2525
16	1,0082	-0,3341	33	1,0113	-0,2653
17	1,0085	-0,3271			



Gambar. 9. Perbandingan Profil Tegangan Untuk Kasus 3, Kasus 4 dan Kasus 5

Dari Tabel IX terlihat bahwa tegangan minimum ada di bus-25 sebesar 0,9855 pu. Perbandingan profil tegangan setelah dilakukan rekonfigurasi ditunjukkan Gambar. 9.

Dari Gambar. 9 terlihat bahwa ketika penyulang direkonfigurasi magnitudo tegangan dengan status PV-bus di kedua DG tidak terlalu homogen. Hanya pada bus-13 dan bus-33 mengalami kenaikan yang signifikan akibat injeksi daya reaktif yang proporsional dari pembangkit terpasang. Meski demikian semua tegangan bus berada pada rentang nilai yang diijinkan yaitu antara 0,95 sampai 1 per unit. Kelebihan dari konfigurasi ini adalah apabila terjadi kenaikan beban yang signifikan, kedua DG dapat merespon dengan menambah injeksi daya reaktif ke penyulang melalui masing-masing bus sehingga performa tegangan pada bus-bus pada penyulang akan tetap terjaga. Besar kontribusi daya aktif dan daya reaktif kedua DG dapat dilihat pada Tabel X.

Dari Tabel XI terlihat bahwa pada kondisi pembebanan yang konstan (*steady state*), kehilangan daya pada jaring distribusi yang sebelumnya sebesar 201,6 kW dapat diturunkan 39 kW, 36,1 kW, 38,8 kW dan 43,3 kW menggunakan skenario kasus 2, 3, 4 dan 5. Persentase pengurangan kehilangan daya distribusi pada kasus 2 sampai 5 adalah sebesar 80,6%, 82,1%, 80,75% dan 78,5%. Data-data tersebut membuktikan bahwa terjadi penurunan total kehilangan daya yang signifikan pada saluran apabila dilakukan instalasi pembangkit tersebar (*distributed generators*) yang terhubung langsung ke bus tegangan menengah (kasus 2) atau dengan lebih mengoptimalkan lagi melalui prosedur rekonfigurasi pada saluran jaring distribusi (kasus 3 sampai 5).

Gambar. 10 menunjukkan dengan jelas bahwa pengurangan total kehilangan daya pada penyulang sangat signifikan terjadi pada kasus 3 yaitu saat semua pembangkit yang terhubung merupakan model pembangkit tipe PQ-bus. Hasil ini merupakan dampak langsung dari injeksi daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAr) yang maksimal dari kedua pembangkit yang kemudian dilakukan rekonfigurasi.

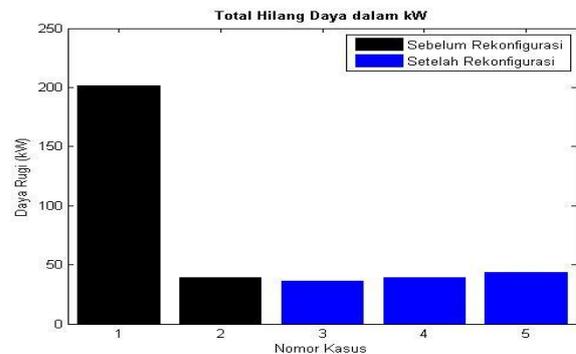
Gambar. 11 menunjukkan performa magnitudo tegangan di setiap bus pada berbagai skenario.

Tabel 10 Perbandingan kontribusi daya kedua dengan g pada kasus 3 dan kasus 5

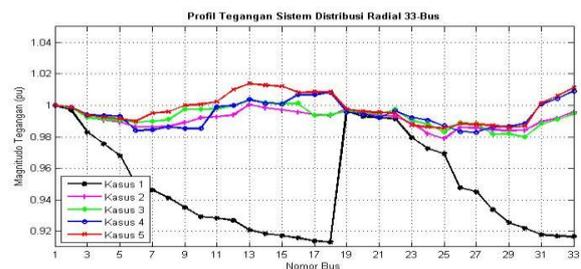
Generator	Kasus 3			Kasus 5			No. Bus
	kW	kVAr	cos ϕ	kW	kVAr	Set point	
DG-1	900	578	0,85	900	490	$V_{33} = 1$ p.u.	13
DG-2	800	705	0,75	1100	1023	$V_{33} = 1$ p.u.	33

Tabel 11 Hasil-Hasil Simulasi Sistem Distribusi Radial 33-Bus

Skenario	Saluran yg Dibuka	Kehilangan Daya (kW)	Injeksi Daya DG (total)		Pengurangan Kehilangan Daya (%)	Tegangan Rata-Rata (p.u.)
			kW	kVAr		
Kasus 1 (base case)	33, 34, 35, 36, 37	201,6	-	-	-	0,9485
Kasus 2 (kedua DG status PQ-bus, tidak direkonfigurasi)	33, 34, 35, 36, 37	39	1.700	1.283	80,6	0,9911
Kasus 3 (sama seperti kasus 2, tapi direkonfigurasi)	6, 8, 16, 27, 34	36,1	1.700	1.283	82,1	0,9930
Kasus 4 (DG1 status PQ-bus, DG2 PV-bus dan direkonfigurasi)	5, 10, 15, 27, 34	38,8	2.000	1.379	80,75	0,9946
Kasus 5 (kedua DG status PV-bus dan direkonfigurasi)	6, 15, 28, 34, 35	43,3	2.000	1513	78,5	0,9980



Gambar. 10. Total Kehilangan Daya Penyulang 33-Bus Pada Berbagai Skenario



Gambar. 11. Profil Tegangan Sistem 33-Bus Pada Berbagai Kondisi Simulasi

Terlihat bahwa kasus 3 dan 4 memberikan nilai tegangan terbaik yang mendekati homogen. Perlu diperhatikan bahwa kasus 4 yakni salah satu pembangkit dimodelkan dalam PV-bus masih menyimpan cadangan daya reaktif untuk memenuhi permintaan sistem saat beban meningkat.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi pada sistem distribusi radial IEEE 33-bus yang dihubungkan dengan 2 pembangkit tersebar yang berkapasitas total 2000 kW (53,8% dari permintaan beban penyulang) maka didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Rekonfigurasi pada sistem existing dapat menaikkan magnitudo tegangan di setiap bus pada level yang cenderung homogen meskipun bus-bus tersebut jauh dari gardu induk (Gambar. 11).
2. Dengan rekonfigurasi menggunakan HSA, kombinasi buka-tutup CB yang optimal pada penyulang bisa ditemukan dengan cepat (< 30 detik) pada kondisi operasional dan status DG yang berbeda-beda sehingga metode ini sangat cocok untuk operasi pengaturan distribusi *real time* (Tabel XI).
3. Pembangkit tersebar yang dimodelkan sebagai PV-bus dapat menjaga magnitudo tegangan pada bus yang terhubung langsung dengannya dengan menginjeksi daya reaktif (kVAr) dengan nilai tertentu.
4. Kehilangan daya total pada sistem 33-bus yang awalnya sebesar 201,6 kW turun menjadi 39 kW atau turun sebesar 80,6% ketika terdapat penetrasi pembangkit tersebar yang menanggung separuh permintaan beban penyulang.
5. Setelah dilakukan rekonfigurasi, kehilangan daya total dapat turun lagi menjadi 36,1 kW atau lebih rendah 7,4% daripada bila tidak dilakukan rekonfigurasi pada penyulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Rashidi, M.R. and M.E. El-Hawary, "A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems." *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 2009. Vol.13, No.4, pp. 913-918.
- Baran ME, dan F. Wu, "Network reconfiguration in distribution system for loss reduction and load balancing", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.4, no.2, 1989, hal. 1401-1407.
- Civanlar S., J. Grainger, H. Yin, and S. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for

loss reduction," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, Juli 1998, hal. 1217-1223.

Cokorde, GIP, 2007, "Rekonfigurasi Jaring Distribusi Tenaga Listrik Menggunakan Breeding Genetic Algorithm (BGA)", *Tesis Master*, ITS, Surabaya.

Eddon, M, 2008, "Rekonfigurasi jaring distribusi untuk meminimalkan rugi daya dan jatuh tegangan menggunakan metoda Fuzzy-Ant Colony Optimization (ACO)", *Tesis Master*, ITS, Surabaya.

Faiz, RM , 2003, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Untuk Pemulihan Pelayanan Menggunakan Metode Fuzzy-GA", *Tesis Master*, ITS, Surabaya.

Gonzales A, FM Echavarren, L Rouco, T Gomez and J Cabetas, "Reconfiguration of large-scale distribution networks for planning studies", *Elsevier Journal of Elect. Power & Energy Systems*, vol.37, 2012, hal. 86-94.

Julianus, GD, 2008, "Estimasi Pengurangan Susut Distribusi Menggunakan Kombinasi Rekonfigurasi dengan Algoritma Ant Colony dan Pemasangan Filter Harmonic", *Tesis Master*, ITS, Surabaya.

Merlin A., dan H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," in *Proc. 5th Power System Computation Conf. (PSCC)*, Cambridge, U.K., 1975, hal. 1-18.

Moghaddas, SM, Tafreshi, dan E. Mashhour, "Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation", *Elect. Power Syst. Research*, vol. 79, 2009, hal. 680-686.

Shirmohammadi D., dan H.W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, April 1989, hal. 1492-1498.

Stephan, 2011, "Rekonfigurasi Jaring Distribusi Untuk Meminimalkan Kerugian Daya Menggunakan Two Layer - Particle Swarm Optimization (TL-PSO)", *Tesis Master*, ITS, Surabaya.

Syai'in, M, A. Soeprijanto, O. Penangsang, JD. Giu, "Integrasi Sumber Renewable Energy Pada Sistem Distribusi Menggunakan Metode Direct- Zbr+IPSO", *Jurnal Elite Elektro*, 2012, vol.3, no.2, hal. 71-78.

- 10 Giu, Rekonfigurasi Optimal Sistem Distribusi yang Terintegrasi Pembangkit Tersebar Terbarukan Menggunakan Algoritma *Harmony Search*