INTEGRASI *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV SEBAGAI UPAYA MENGURANGI *LOSSES* DAN MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN

Taufik Hidayat^{1)*}, Lauhil Mahfudz Hayusman²⁾, Rachmadi Setiawan³⁾

^{1),2)} Program Studi Teknologi Listrik DIII, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang

³⁾ Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang

Abstrak, Pengembangan pembangkit tersebar atau yang dikenal dengan istilah *Distributed Generation* (DG) diarahkan untuk memenuhi pertumbuhan beban yang jauh dari pusat pembangkit konvensional, dan untuk wilayah tertentu diutamakan untuk memenuhi kekurangan pasokan tenaga listrik. Pemanfaatan sumber energi setempat khususnya energi baru terbarukan sangat dibutuhkan untuk mendukung program pemerintah dalam mengurangi penggunaan sumber energi fosil. Energi baru terbarukan merupakan energi yang ramah lingkungan, berkelanjutan, ekonomis dan mudah diimplementasikan. DG merupakan unit pembangkit skala kecil yang terhubung dengan sistem distribusi, dapat langsung diinjeksikan dekat dengan pusat beban sehingga dapat meningkatkan profil tegangan sistem dengan mengurangi rugi-rugi daya. Penelitian ini membahas pemodelan DG (PLTMH dan PLTS) yang akan diinjeksikan ke bus-bus yang kritis yang memiliki nilai tegangan dibawah standar operasi jaringan. Analisis dilakukan dengan 4 kondisi pengujian yaitu kondisi awal sistem, kondisi injeksi PLTMH Seloliman, kondisi Injeksi PLTS, kondisi injeksi PLTMH dan PLTS secara bersamaan. Hasil yang diperoleh menunjukkan kondisi yang optimal pada saat PLTMH Seloliman dan PLTS di injeksikan, dimana dapat meningkatkan nilai tegangan pada bus-bus beban yang kritis jaringan dilevel standar nilai tegangan operasi yaitu 20 kV.

Kata Kunci: *Distributed Generation* (DG), profil tegangan, rugi-rugi daya, energi baru terbarukan.

PENDAHULUAN

Setiap tahun kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk. Kebutuhan energi listrik mutlak harus dipenuhi oleh penyedia tenaga listrik, akan tetapi sumber energi listrik utama di Indonesia masih mengandalkan sumber energi fosil. Hal tersebut memunculkan masalah, karena kesediaan cadangan energi fosil sangat terbatas.

Menurut Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia tahun 2016 tentang pengesahan RUPTL-PLN menyatakan bahwa sampai dengan tahun 2015 kapasitas terpasang pembangkit PLN dan IPP (Independent Power producer) di Indonesia adalah 48.065 MW yang terdiri dari 33.824 MW di sistem Jawa-Bali dan 10.091 MW di sistem kelistrikan wilayah Sumatra dan 4.150 MW di Indonesia Timur. Rasio elektrifikasi nasional mencapai 75,83% [4]. Akan tetapi berdasarkan wilayahnya, Indonesia bagian timur masih di bawah 60% bahkan di Papua rasio elektrifikasi 35,89%. Masih kecilnya rasio elektrifikasi tersebut salah satu faktor penyebabnya adalah keterbatasan kemampuan

pembangkit PLN dan letak geografis sebagian wilayah Indonesia yang terpencil [3].

Pengembangan sumber energi matahari dan beberapa sumber energi terbarukan di Indonesia saat ini hanya diaplikasikan pada kebutuhan lokal (*stand alone*). Pemanfaatan energi terbarukan di dunia saat ini dikembangkan pada sistem pembangkitan tersebar pada jaringan distribusi atau lebih dikenal dengan istilah *Distributed Generations* (DG) [1]. Sistem DG adalah pembangkitan tersebar yang terhubung langsung ke jaringan distribusi pada sisi pelanggan. Penerapan *Photovoltaic* menggunakan sistem DG menjadi sebuah harapan besar Indonesia untuk memaksimalkan pasokan listrik, mengurangi penggunaan konsumsi solar, dan peningkatan kualitas daya listrik [2].

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh integrasi DG pada sistem distribusi 20 kV penyulang Jolotundo Mojokerto dengan pembebanan maksimal. Analisis aliran daya menggunakan metode newton raphson dengan 4 kondisi pengujian yaitu kondisi awal sistem, kondisi injeksi PLTMH Seloliman,

kondisi injeksi PLTS, kondisi PLTMH Seloliman dan PLTS secara bersamaan.

Analisis Aliran Daya

Masalah aliran daya dapat diselesaikan dengan metode *Newton-Raphson* menggunakan sejumlah persamaan nonlinear untuk menyatakan daya aktif dan reaktif. Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Persamaan daya pada suatu bus i dapat ditulis [6]:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan di atas bila ditulis dalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots (2)$$

Daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots (3)$$

Substitusi dari Persamaan (2) untuk I_i ke dalam Persamaan (3) menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots (4)$$

Pisahkan bagian real dan imajiner:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (6)$$

Persamaan (5) dan (6) membentuk persamaan aljabar nonlinear dengan variabel sendiri. Besarnya setiap variabel dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam satuan radian. Persamaan (5) dan (6) dikembangkan dari deret *Taylor* seperti persamaan di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

Matrik *Jacobian* memberikan perbandingan linear antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta \theta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

Banyaknya elemen matrik *Jacobian* dari Persamaan (8) ditentukan dengan $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ dengan n adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya *voltage-controlled buses* pada sistem. J_1 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1)$, J_2 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1-m)$, J_3 diperoleh dari $(n-1-m) \times (n-1)$ dan J_4 diperoleh dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$.

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_1 adalah:

Untuk $j \neq 1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (10)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_2 adalah:

Untuk $j \neq 1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ij}|\cos\theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (12)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_3 adalah:

Untuk $j \neq 1$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (14)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_4 adalah:

Untuk $j \neq 1$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}|\sin\theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (16)$$

Harga dari $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut dengan sisa daya (*power residual*) yang diberikan dengan persamaan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (18)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (20)$$

Keterangan:

$|V_i^{(k+1)}|$ = Nilai magnitude tegangan baru.

$|V_i^{(k)}|$ = Nilai magnitude tegangan lama.

$\Delta |V_i^{(k)}|$ = Nilai koreksi tegangan.

$\Delta \delta_i^{(k+1)}$ = sudut fasa tegangan baru.

$\delta_i^{(k)}$ = Sudut fasa tegangan lama.

$\Delta Q_i^{(k)}$ = Nilai koreksi sudut fasa tegangan.

Prosedur penyelesaian proses iterasi akan berhenti jika nilai konvergen (ϵ) sudah terpenuhi:

$$\Delta P_i^{(k)} \geq \epsilon \quad (21)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} \leq \epsilon \quad (22)$$

METODE

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur, jurnal-jurnal yang relevan dengan topik penelitian yang dibahas dan terbaru (± 5 Tahun terakhir). Melakukan pengumpulan data lapangan penyulang Jolotundo 20 kV UPJ Pacet Mojokerto, meliputi: data digram segaris penyulang jolotundo; data transformator: kapasitas trafo (kVA), rasio tegangan trafo (kV), impedansi trafo; Data kabel: jenis kabel, luas penampang kabel (mm²), panjang kabel (km), impedansi kabel; data beban: waktu beban puncak (WBP), luar waktu beban puncak (LWBP), data profil tegangan (Volt) dan rugi-rugi daya (*Plosses* dan *Qlosses*) penyulang Jolotundo. Data PLTMH Seloliman, meliputi data Generator: kapasitas daya (kW), eksiter dan governor; data transformator: kapasitas trafo (kVA), rasio tegangan trafo (kV), impedansi trafo. Selanjutnya dilakukan pemodelan penyulang Jolotundo sebelum injeksi PLTMH Seloliman, melakukan analisis aliran daya menggunakan metode *newton raphson* pada saat pembeban maksimum. Apabila hasil analisis aliran daya menunjukkan terjadinya rugi-rugi daya (*Plosses* dan *Qlosses*) dan profil tegangan diluar batas yang diperbolehkan yaitu +5%, -10% (Permen ESDM 2003) maka dilakukan integrasi DG-1 (PLTM Seloliman). Injeksi PLTMH seloliman berdasarkan kondisi lapangan, sedangkan injeksi *Photovoltaic* (PV) berdasarkan hasil analisis aliran daya sebelum dan sesudah injeksi DG-1 (PLTMH Seloliman) dengan mencari bus-bus yang mengalami rugi-rugi daya dan penurunan tegangan terbesar. Melakukan analisis hasil program, sebelum dan sesudah injeksi DG

Gambar 1. Alur penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Nilai Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Kondisi Awal Sistem

Hasil analisis aliran daya pada kondisi awal sistem menunjukkan terjadi penurunan tegangan di semua bus pada penyulang seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Gambar 2. Grafik nilai tegangan bus kondisi awal sistem

Bus yang mengalami penurunan nilai tegangan tertinggi terjadi pada bus 112 yaitu sebesar 17,73 kV atau 11,36 %. Penurunan tegangan terjadi diatas -10% dari tegangan nominal 20 kV. Rugi-rugi daya aktif pada kondisi awal terjadi sebesar 848 kW.

B. Nilai Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Setelah Injeksi DG (PLTMH Seloliman & PLTS)

Hasil analisis aliran daya setelah injeksi DG-1 dan DG-2 (PLTMH Seloliman dan PLTS) menunjukkan perubahan pola aliran daya dan memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan nilai tegangan bus dan penurunan rugi-rugi daya pada penyulang.

Gambar 2. Grafik perbandingan nilai tegangan bus kondisi awal sistem dan setelah injeksi DG

Gambar 2 memperlihatkan nilai tegangan bus setelah injeksi DG. Pada saat injeksi DG-1 (PLTMH Seloliman) bus yang mengalami

Hasil aliran daya dan losses	Kondisi Pengujian Sistem			
	Kondisi Awal	Injeksi DG-1	Injeksi DG-2	Injeksi DG-1 & DG-2
Total Pembangkitan				
Daya aktif (kW)	5094	5189	5574	5658
Daya reaktif (kVAR)	3172	3174	3240	3314
Total Pembebanan				
Daya aktif (kW)	4246	4464	4949	5121
Daya reaktif (kVAR)	2987	2993	3093	3182
Total losses				
Daya aktif (kW)	848	725	625	537
Daya reaktif (kVAR)	185	181	147	132
Prosentase losses				
Daya aktif (%)	16,6	13,9	11,2	9,5
Daya reaktif (%)	5,8	5,7	4,5	3,9

Tabel 1. Perbandingan total rugi-rugi daya kondisi awal dan injeksi DG

penurunan tegangan tertinggi terjadi pada bus 108 yaitu sebesar $V = 18,01$ kV atau 9,95 %.

Pada saat injeksi DG-2 (PLTS) bus yang mengalami penurunan nilai tegangan tertinggi terjadi pada bus 76 yaitu sebesar $V = 18,33$ kV atau 8,35 %. Pada saat injeksi DG-1 & DG-2 bus yang mengalami penurunan nilai tegangan tertinggi terjadi pada bus 31 yaitu sebesar $V = 19,29$ kV atau 3,55%.

Hasil analisis aliran daya untuk 4 kondisi pengujian sistem diperoleh nilai perbandingan total rugi-rugi daya seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Dari perbandingan total rugi-rugi daya 4 kondisi pengujian sistem diperoleh nilai prosentase rugi-rugi daya (*losses*) terkecil pada saat injeksi PLTMH Seloliman dan PLTS (DG-1 & DG-2) yaitu sebesar 537 kW atau 9,5%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil analisis dapat diambil kesimpulan yaitu;

1. Hasil analisis aliran daya sebelum injeksi DG, beberapa bus mengalami penurunan tegangan dibawah standar operasi jaringan yaitu -10%. Bus yang mengalami penurunan paling tinggi terjadi pada bus 112 yaitu sebesar 11,36 %.
2. Hasil analisis aliran daya sesudah injeksi DG memberikan pengaruh yang signifikan, yaitu dapat mengurangi terjadinya rugi-rugi daya listrik dan dapat meningkatkan nilai tegangan pada sisi beban di level standar nilai tegangan yang ditetapkan yaitu 20 kV

DAFTAR PUSTAKA

- Ackermann, T, Andersson, G dan Soder, L. 2001. *Distributed generation: a definition*. Elsevier, Electric Power Systems Research, no. 57, Page(s) .195-204.
- Buayai, K., Wartana, I. M., Sreedharan, S., & Ongsakul, W, 2011, A Multi-objective Optimal Placement of Multi-Type DG for Enhancement of Power System Performance by NSGA-II. *GMSARN International Journal*, 5(2), 97-104.
- Kementrian ESDM Nomor 5889. 2016. Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik-PLN Tahun 2016 sampai dengan 2025.
- K-ESDM. 2013. Kajian Supply Demand Energy. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Lopes, P. C. 2007. *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities*. Elsevier, Electric Power Systems Research, no. 77, Page.1189-1203.
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc. USA.