

STUDI PENGATURAN TEGANGAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV YANG TERHUBUNG DENGAN *DISTRIBUTED GENERATION* (STUDI KASUS: PENYULANG TR 5 GI TARUTUNG)

Andika Handy ⁽¹⁾, Zulkarnaen Pane ⁽²⁾

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: andika.handy@gmail.com

Abstrak

Kehadiran Distributed Generation (DG) yang telah meluas pada jaringan distribusi memberikan keuntungan dan kerugian tersendiri. Salah satu kerugian tersebut adalah sulitnya mempertahankan nilai tegangan yang memadai akibat aliran daya yang tidak satu arah (*uniflow*). Diperlukan pengaturan tegangan untuk menjaga nilai tegangan berada pada variasi standar yang diizinkan sebesar +5% dan -10% dari tegangan nominal di seluruh jaringan distribusi dan variasi sebesar $\pm 5\%$ dari tegangan nominal pada titik hubung antara DG dan jaringan distribusi. Dalam Tulisan ini, membahas tentang studi pengaturan tegangan menggunakan On-Load Tap Changer (OLTC) transformator dan kapasitor bank pada jaringan distribusi 20 kV penyulang TR 5 Gardu Induk Tarutung yang terhubung dengan PLTM Aek Hutaraja 2 x 3 MW dalam keadaan beban puncak menggunakan bantuan program komputer. Dari hasil studi pengaturan tegangan tersebut didapatkan bahwa saat jaringan belum terhubung dengan DG dibutuhkan pengaturan tegangan dengan kapasitor bank yang mempunyai rating total sebesar 1.375 KVAR dan posisi tap OLTC pada tap 5 (157,5 kV), sedangkan ketika terhubung dengan DG hanya dibutuhkan pengaturan tegangan menggunakan OLTC pada posisi tap 7 (153,8 kV) untuk mendapatkan nilai tegangan pada standar yang telah diizinkan.

Kata Kunci: *distributed generation*, kapasitor bank, *on-load tap changer*, aliran daya balik, studi aliran daya, beban puncak

1. Pendahuluan

Penerapan pembangkit listrik yang berdasarkan kepada energi terbarukan sekarang sangat banyak diaplikasikan melalui DG. Kehadiran DG memberikan keuntungan tersendiri baik dari segi pembangkit maupun dari segi konsumen. Tetapi, kehadiran DG juga merubah arah aliran daya pada jaringan distribusi sehingga arah aliran daya tidak satu arah (*uniflow*) lagi. Perubahan arah aliran daya menyebabkan kesulitan tersendiri bagi jaringan untuk mempertahankan pengaturan tegangan yang memadai. Hal ini berdampak pada pengoperasian peralatan pengaturan tegangan seperti kapasitor bank dan OLTC yang harus dilakukan penyesuaian setelah kehadiran DG pada jaringan.

2. Studi Pengaturan Tegangan pada Jaringan Distribusi

Pengaturan tegangan yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan *On-Load Tap Changer* transformator dan kapasitor bank.

2.1 *Distributed Generation*

DG didefinisikan sebagai pembangkit tenaga listrik dengan skala kecil (<10 MW) yang ditempatkan pada sisi beban pada jaringan distribusi [1].

DG memberikan keuntungan jika dilakukan interkoneksi pada jaringan distribusi, diantaranya [1]:

1. Meningkatkan ketersediaan dan keandalan energi listrik.
2. Dapat mengurangi beban puncak.
3. Dapat menghemat energi dikarenakan sumber energi utama DG umumnya memanfaatkan energi yang terbarukan.

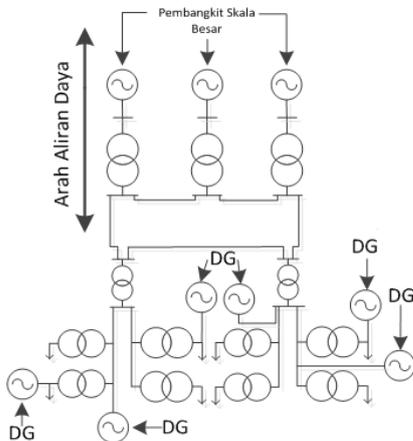
4. Dapat menjadi alternatif untuk kompensasi daya reaktif karena dapat mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan
5. Mengurangi harmonisa dan tegangan kedip
6. Dalam proses pembangkitan energi listrik, DG bersifat ramah lingkungan karena emisi CO₂ yang dihasilkan rendah.

a. Small Hydro Power

Small hydro power memanfaatkan tenaga air sebagai sumber energi utama dengan kapasitas pembangkitan dibawah 10 MW. Istilah lain yang sering digunakan adalah *mini hidropower* dengan kapasitas 100 kW sampai dengan 1 MW, dan *micro hidropower* dengan kapasitas dibawah 100 kW [2].

b. Dampak Interkoneksi Distributed Generation

Penambahan pembangkit lokal merubah arah aliran daya dan membuat aliran daya sulit untuk diprediksi. Hal ini menyebabkan sistem distribusi tidak dapat lagi ditinjau sebagai sistem yang hanya menggunakan satu arah aliran daya [2]. Pengaruh interkoneksi DG terhadap jaringan distribusi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Sistem Kelistrikan Dengan Terhubung Distributed Generation

2.2 Profil Tegangan pada Sistem Distribusi

Profil tegangan pada sistem distribusi meliputi jatuh tegangan dan kenaikan tegangan (*voltage rise*), serta standar tegangan pada sistem distribusi.

a. Jatuh Tegangan

Nilai jatuh tegangan pada jaringan distribusi tanpa adanya DG diberikan oleh Persamaan (1) [2]:

$$\Delta V = \frac{(RP+XQ)}{V_R} \quad (1)$$

Dimana ΔV adalah jatuh tegangan pada penyulang; R adalah resistansi penyulang; X adalah reaktansi penyulang; P adalah daya yang diterima beban; Q adalah daya reaktif yang diterima beban; dan V_R adalah tegangan pada sisi penerima.

Dari Persamaan (1) terlihat nilai jatuh tegangan ditentukan oleh beberapa faktor yang meliputi daya aktif (P), resistansi dan reaktansi saluran (R dan X), serta daya reaktif (Q).

Sedangkan nilai jatuh tegangan pada jaringan distribusi dengan adanya DG diberikan oleh Persamaan (2) [2]:

$$\Delta V \approx \frac{R(P - P_{DG}) + X(Q - (\pm Q_{DG}))}{V_R} \quad (2)$$

dimana P_{DG} dan Q_{DG} masing-masing menunjukkan daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan DG.

Berdasarkan Persamaan (2), DG selalu menurunkan nilai jatuh tegangan penyulang jika DG menghasilkan daya reaktif (Q_{DG} bernilai positif) atau tidak bertukar daya reaktif dengan jaringan (*grid*). Tetapi saat DG menyerap daya reaktif (Q_{DG} bernilai negatif), DG dapat meningkatkan nilai jatuh tegangan.

b. Kenaikan Tegangan

Untuk menyalurkan daya, DG cenderung beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan titik lain dimana daya disalurkan. Hal ini dijelaskan oleh Persamaan (3) [3]:

$$V_R \approx V_S + \frac{RP+XQ}{V_R} \quad (3)$$

dimana V_S adalah tegangan pada sisi pengirim. Persamaan (3) menunjukkan bahwa nilai tegangan di titik interkoneksi DG akan meningkat melebihi tegangan pada ujung pengirim.

c. Standar Tegangan pada Sistem Distribusi

Variasi tegangan pada sistem distribusi yang dikeluarkan oleh PLN adalah sebesar +5% dan -10% dari nilai tegangan nominal [4]. Sedangkan standar tegangan yang dikeluarkan oleh IEEE std. 1547 menyatakan bahwa fluktuasi tegangan pada titik sambungan DG pada daerah Electrical Power System (EPS) harus berada pada kisaran $\pm 5\%$ dari nilai tegangan nominal [2].

2.3 Metode Pengaturan Tegangan

Metode pengaturan tegangan yang digunakan pada tulisan ini meliputi:

a. On-Load Tap Changer Transformator

Digunakan perubahan posisi tap untuk mendapatkan level tegangan yang sesuai. Tap pada transformator yang dapat dirubah saat keadaan berbeban disebut dengan On-Load Tap Changer (OLTC). OLTC yang digunakan dalam Tulisan ini ditempatkan pada sisi primer transformator 150 kV. OLTC ini mempunyai perubahan tegangan di setiap tap sebesar 1,25% (1,9 kV) dan juga mempunyai 17 posisi tap dengan posisi tap awal pada posisi tap 9.

b. Kapasitor Bank

Pengaturan tegangan dapat dilakukan dengan mengatur daya reaktif sistem. Pengaturan daya reaktif yang umum digunakan adalah kapasitor bank. Daya reaktif yang diinjeksikan kapasitor akan mengkompensasi kebutuhan daya reaktif dan juga meningkatkan tegangan sesuai dengan Persamaan (4) [2]:

$$\Delta V \approx \frac{RP + X(Q-Q_c)}{V_R} \quad (4)$$

dimana Q_c merupakan daya reaktif yang dihasilkan kapasitor.

Daya reaktif yang diinjeksikan kapasitor sesuai dengan Persamaan (4) akan

mengkompensasi kebutuhan daya reaktif dan juga menurunkan jatuh tegangan penyulang.

Pemilihan penempatan kapasitor bank pada Tulisan ini menggunakan metode 1/2-KVAR rule dimana kapasitor dengan rating yang telah ditentukan ditempatkan pada titik dengan besar daya reaktif setengah dari rating KVAR kapasitor tersebut [6].

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di jaringan distribusi 20 KV penyulang TR 5 dari Gardu Induk (GI) Tarutung yang terhubung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) Hutaraja berkapasitas 2 x 3 MW.

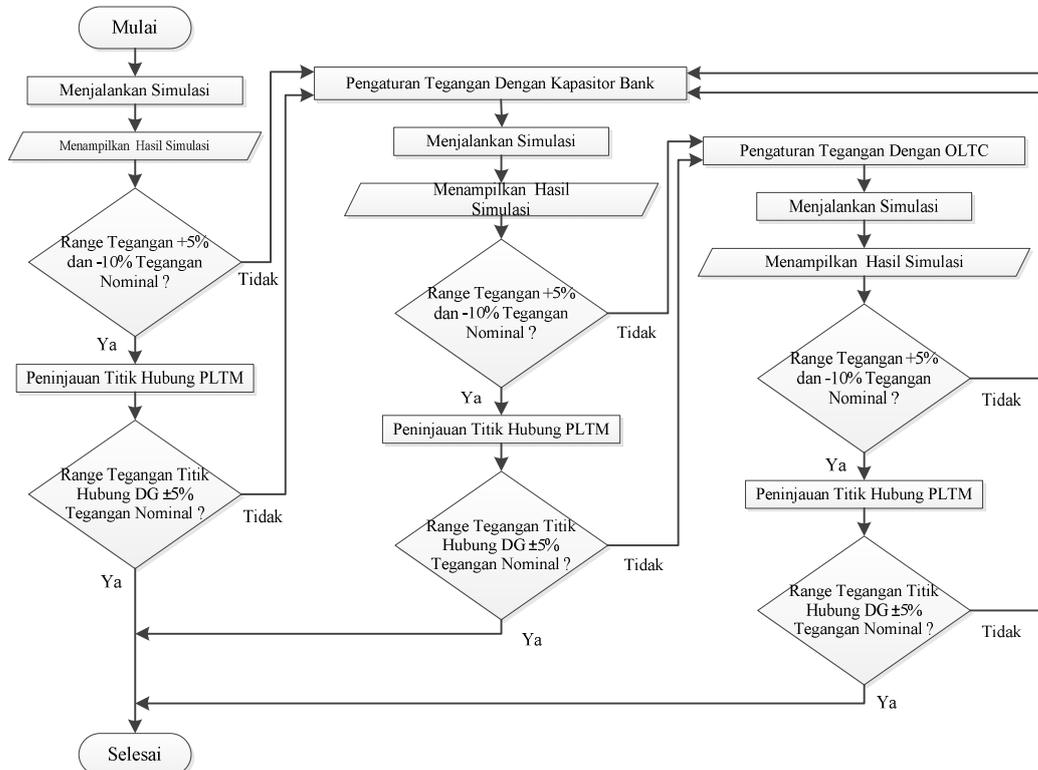
Studi pengaturan tegangan dilakukan dengan menggunakan bantuan program komputer yang dapat melakukan simulasi aliran daya dalam kondisi beban seimbang.

1.1 Pengambilan dan Pengumpulan Data yang Dibutuhkan

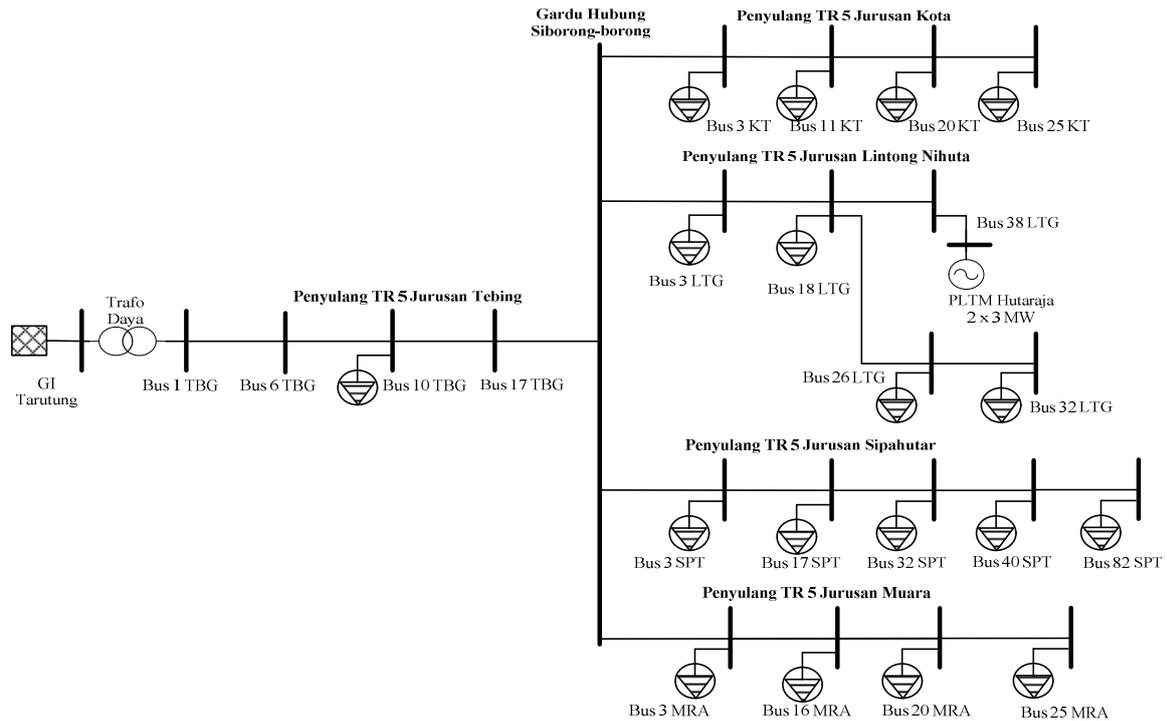
Pengambilan data yang dibutuhkan dilakukan di P.T PLN (Persero) untuk data GI Tarutung dan data penyaluran jaringan distribusi serta P.T Humbahas Bumi Energi untuk data PLTM Hutaraja 2 x 3 MW.

1.2 Studi Pengaturan Tegangan

Dalam melakukan studi pengaturan tegangan diagram alirnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Alir Pengaturan Tegangan



Gambar 3 One Line Diagram Penyulang TR 5 GI Tarutung yang Terhubung Dengan Distributed Generation

2. Hasil dan Pembahasan

Studi pengaturan tegangan dilakukan pada kondisi beban puncak saat jaringan tidak terhubung dan terhubung dengan *distributed generation*. Peninjauan nilai tegangan dilakukan di beberapa titik bus tertentu yang meliputi:

1. Titik bus 1 TBG sebagai titik awal busbar GI Tarutung
2. Titik bus 38 LTG sebagai titik hubung antara DG dan jaringan distribusi 20 kV
3. Titik bus 25 KT sebagai titik terjauh penyulang TR 5 Jurusan Kota
4. Titik bus 32 LTG sebagai titik terjauh penyulang TR 5 jurusan Lintong Nihuta
5. Titik bus 82 SPT sebagai titik terjauh penyulang TR 5 jurusan Sipahutar
6. Titik bus 27 MRA sebagai titik terjauh penyulang TR 5 jurusan Muara

Titik-titik peninjauan tersebut pada penyulang TR 5 dapat dilihat pada Gambar 3.

2.1 Profil Tegangan Tanpa Terhubung DG

2.1.1 Tanpa Dilakukan Pengaturan Tegangan

Nilai tegangan dan jatuh tegangan penyulang TR 5 tanpa pengaturan tegangan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Tanpa Pengaturan Tegangan

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 96,87 % | 3,13 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 87,37 % | 12,63 % |
| 3 | Bus 25 KT | 87,09 % | 12,91 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 87,16 % | 12,84 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 84,73 % | 15,27 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 86,72 % | 13,28 % |

Dari Tabel 1 terlihat bahwa nilai tegangan di titik terjauh penyulang berada di bawah nilai tegangan yang diizinkan sebesar -10%. Oleh sebab itu, diperlukan pengaturan tegangan dengan kapasitor bank.

2.1.2 Pengaturan Tegangan Dengan Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan metode pengaturan tegangan awal yang digunakan untuk memperbaiki profil tegangan pada penyulang TR 5. Dengan menggunakan metode *1/2-KVAR rule*, didapatkan letak penempatan dan besar *rating* kapasitor bank seperti terlihat pada Tabel 2. Total ukuran kapasitor bank yang dipasang sebesar 1.375 kVAR. Letak penempatan kapasitor bank di penyulang TR 5 sesuai dengan Tabel 2 dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1 Hasil Pemilihan Ukuran dan Penempatan Kapasitor Bank pada Penyulang TR 5

| No. | Ukuran Kapasitor Bank | Letak Penempatan Kapasitor Bank |
|-----|-----------------------|---------------------------------|
| 1 | 600 KVAR | Bus 10 TBG |
| 2 | 250 KVAR | Bus 11 KT |
| 3 | 175 KVAR | Bus 18 LTG |
| 4 | 200 KVAR | Bus 17 SPT |
| 5 | 150 KVAR | Bus 16 MRA |

Tabel 3 menunjukkan nilai tegangan dan jatuh tegangan penyulang TR 5 saat dilakukan pengaturan tegangan dengan kapasitor bank.

Tabel 3 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Dengan Kapasitor Bank

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 98,17 % | 1,83 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 91,38 % | 8,62 % |
| 3 | Bus 25 KT | 90,9 % | 9,1 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 91,16 % | 8,84 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 88,7 % | 11,3 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 90,76 % | 9,24 % |

Nilai tegangan di Tabel 3 pada setiap bus telah berada pada nilai tegangan yang diizinkan, kecuali pada bus 82 SPT akibat jatuh tegangan yang besar. Selain itu, nilai tegangan pada titik hubung antara DG dengan jaringan distribusi pada bus 38 LTG belum memenuhi variasi tegangan $\pm 5\%$ agar DG dapat terinterkoneksi dengan jaringan. Oleh sebab itu, dibutuhkan pengaturan tegangan lanjutan menggunakan OLTC transformator.

2.1.3 Pengaturan Tegangan Dengan Kapasitor Bank On-Load Tap Changer Transformator

Pengaturan tegangan hanya menggunakan kapasitor bank ternyata belum cukup untuk memperbaiki profil tegangan penyulang TR 5 hingga berada pada nilai tegangan yang diizinkan. Oleh sebab itu, dilakukan perubahan posisi tap OLTC yang dikombinasikan dengan kapasitor bank yang telah dilakukan pemasangan sebelumnya untuk meningkatkan tegangan di penyulang.

Posisi tap OLTC dirubah dari posisi awal tap 9 (150 kV) menjadi posisi tap 5 (157,5 kV). Nilai tegangan dan jatuh tegangan setelah dilakukan perubahan posisi tap transformator terlihat pada Tabel 4.

Tabel 2 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Dengan Kapasitor Bank dan OLTC Transformator

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 103,16 | -3,16 |
| 2 | Bus 38 LTG | 95,64 % | 4,36 % |
| 3 | Bus 25 KT | 95,15 % | 4,85 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 95,41 % | 4,59 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 92,83 % | 7,17 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 94,99 % | 5,01 % |

Pada Tabel 4 nilai tegangan pada semua titik bus dan pada titik hubung antara DG dan jaringan distribusi telah berada pada nilai tegangan yang diizinkan sehingga DG sudah dapat terhubung dengan jaringan distribusi tanpa dilakukan pengaturan tegangan lanjutan.

2.2 Profil Tegangan Dengan Terhubung DG

2.2.1 Pengaturan Tegangan Dengan Kapasitor Bank dan Tanpa Penurunan Tap OLTC Transformator

Kapasitor bank dan OLTC pada saat DG telah terhubung dengan jaringan belum mengalami perubahan dari keadaan sebelumnya. Hal ini dapat mengakibatkan profil tegangan pada jaringan tidak berada pada nilai tegangan yang diizinkan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan peninjauan kembali pada operasi kedua peralatan pengatur tegangan tersebut.

PLTM Hutaraja menghasilkan daya keluaran sebesar 2,984 MW untuk satu unit generator dengan total daya keluaran sebesar 5,968 MW untuk dua unit generator. Nilai tegangan dan jatuh tegangan penyulang saat terhubung DG tanpa dilakukan perubahan keadaan pada kapasitor bank dan OLTC ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 3 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Terhubung DG

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 103,4 % | -3,4 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 105,46 % | -5,46 % |
| 3 | Bus 25 KT | 100,01 % | -0,01 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 104,26 % | -4,26 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 97,55 % | 2,45 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 99,82 % | 0,18 % |

Pada Tabel 5 terlihat bahwa telah terjadi kenaikan tegangan pada semua titik bus di penyulang TR 5 akibat interkoneksi DG dengan jaringan distribusi. Kenaikan tegangan tertinggi terjadi pada bus 38 LTG yang menjadi titik interkoneksi jaringan dengan DG. Hal ini sesuai

dengan Persamaan (3) yang menyatakan bahwa nilai tegangan di titik interkoneksi akan melebihi nilai tegangan pada ujung pengirim (bus 1 TBG). Kenaikan tegangan pada bus ini juga telah melewati nilai tegangan yang diizinkan sehingga dibutuhkan switch-off pada seluruh kapasitor bank yang terdapat di jaringan.

2.2.2 Pengaturan Tegangan Dengan Switch-off Kapasitor Bank dan Tanpa Penurunan Tap OLTC Transformator

Nilai tegangan dan jatuh tegangan penyulang TR 5 dengan switch-off kapasitor bank dan tanpa penurunan tap OLTC (masih pada posisi tap 5) ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Terhubung DG Dengan Switch-off Kapasitor Bank

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 102,02 % | -2,02 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 102,68 % | -2,68 % |
| 3 | Bus 25 KT | 96,19 % | 3,81 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 100,31 % | -0,31 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 93,59 % | 6,41 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 95,78 % | 4,22 % |

Dari Tabel 6 terlihat nilai tegangan pada semua titik telah berada pada nilai tegangan yang diizinkan, sehingga tidak dibutuhkan pengaturan tegangan lanjutan

2.2.3 Tanpa Dilakukan Pengaturan Tegangan

Tabel 7 menunjukkan nilai tegangan dan jatuh tegangan saat jaringan hanya terhubung DG tanpa dilakukan pengaturan tegangan.

Tabel 7 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Terhubung DG Tanpa Pengaturan Tegangan

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 96,7 % | 3,3 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 97,78 % | 3,4 % |
| 3 | Bus 25 KT | 91,2 % | 8,8 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 95,37 % | 4,63 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 88,73 % | 11,27 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 90,81 % | 9,19 % |

Pada Tabel 7 ditunjukkan bahwa penyulang TR 5 saat terhubung dengan DG masih harus dilakukan pengaturan tegangan lagi. Hal ini terlihat dari nilai tegangan pada bus 82 SPT. Oleh sebab itu dilakukan penaikan tap OLTC kembali untuk mendapatkan profil tegangan yang ideal di penyulang TR 5.

Posisi tap OLTC yang ideal untuk keadaan ini adalah pada posisi tap 7 (153,8 kV). Tabel 8

memberikan nilai tegangan dan jatuh tegangan saat OLTC diatur pada posisi tap 7.

Tabel 8 Nilai Tegangan dan Jatuh Tegangan Penyulang TR 5 Dengan Pengaturan Tap OLTC pada Posisi Tap 7

| No. | Nomor Bus | Nilai Tegangan | Nilai Jatuh Tegangan |
|-----|------------|----------------|----------------------|
| 1 | Bus 1 TBG | 98,06 % | 1,94 % |
| 2 | Bus 38 LTG | 101,64 % | -1,64 % |
| 3 | Bus 25 KT | 94,96 % | 5,36 % |
| 4 | Bus 32 LTG | 99,26 % | 0,74 % |
| 5 | Bus 82 SPT | 92,62 % | 7,38 % |
| 6 | Bus 27 MRA | 94,78 % | 5,22 % |

Nilai tegangan pada semua titik bus di Tabel 8 telah berada pada nilai tegangan yang diizinkan. Pengaturan tegangan dengan OLTC pada posisi tap 7 merupakan pengaturan tegangan yang paling ideal saat jaringan terhubung dengan DG.

3. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dan analisis, dapat disimpulkan bahwa:

1. Aliran daya akibat injeksi dari DG menyebabkan kenaikan tegangan pada penyulang TR5 GI Tarutung.
2. Pada saat keadaan beban puncak tidak terhubung DG, dibutuhkan metode pengaturan tegangan menggunakan kapasitor bank dan OLTC transformator yang diatur pada tap 5 dari keadaan normal pada tap 9, sedangkan saat keadaan beban puncak terhubung DG, hanya dibutuhkan pengaturan tegangan dengan menggunakan OLTC transformator pada posisi tap 7.

4. Daftar Pustaka

- [1] Ackermann, Thomas, "Distributed generation : a definition," Electric Power System Research, 2000.
- [2] Viawan, F.A., "Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation," Chalmers University of Technology, 2008
- [3] Mahmud, M.A., "Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation", 2011.
- [4] K. P. B. Transmisi, "Tegangan-tegangan Standar", P.T. PLN (PERSERO), Jakarta, 1995.
- [5] Short, T., "Electric Power Distribution Equipment and Systems," CRC Press, New York, 2006.