

PERBAIKAN TEGANGAN SALURAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI 70 KV DAN 150 KV PADA SISTEM KELISTRIKAN FLORES DENGAN TRANSFORMER TAP

Florens Caroline Ludji, Hanny Hosiana Tumbelaka, Yusak Tanoto
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto No. 121-131, Surabaya, 60236, Indonesia
E-Mail: floccarol99@gmail.com, tumbekh@petra.ac.id, tanyusak@petra.ac.id

Abstrak – Kondisi awal tegangan bus dari sistem kelistrikan Flores, Nusa Tenggara Timur pada umumnya berada dibawah tegangan nominal. Untuk mengatasi hal ini digunakan metoda perbaikan tegangan yang diusahakan menggunakan komponen atau peralatan yang ada di sistem sehingga tidak menambah biaya investasi yaitu menggunakan pengaturan tap dari transformer daya yang ada di gardu induk yaitu pengaturan rasio transformasi. Pengaturan tap dilakukan dengan memperhatikan aliran daya reaktif. Single line diagram sistem kelistrikan Flores dibuat modelnya dalam ETAP dan dilakukan analisa load flow. Beban sistem yang digunakan sebesar 81.811 MW. Dari simulasi dibuktikan bahwa dengan pengaturan transformer tap, tegangan bus-bus berhasil dinaikkan lebih mendekati tegangan nominal (100%).

Kata Kunci – transmisi, susut tegangan, transformer tap changer, daya reaktif

I. PENDAHULUAN

Ketersediaan listrik yang cukup dan berkualitas merupakan hal yang harus dipenuhi PLN untuk mengimbangi perkembangan kebutuhan listrik yang sangat pesat saat ini. Demikian juga penyaluran tenaga listrik kepada konsumen harus berjalan dengan baik sesuai dengan yang diharapkan. Pada umumnya, posisi pusat-pusat pembangkit terpisah ratusan kilometer dari pusat-pusat beban, seperti yang ada di wilayah kerja PLN Flores, Nusa Tenggara Timur. Pada sistem kelistrikan Flores, saluran-saluran transmisi AC membawa tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkit ke pusat-pusat beban melalui saluran tegangan tinggi 150 kV, mulai dari Gardu Induk (GI) Wairita. Penyaluran selanjutnya, melalui GI lainnya, transformer penurunan tegangan akan menurunkan tegangan 150 kV ini menjadi tegangan sub-transmisi 70 kV, yang kemudian diturunkan lagi menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada GI distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban, tegangannya akan diubah oleh transformer distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 V.

Penyalurkan tenaga listrik AC dapat dilakukan melalui Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT). Baik saluran udara (overhead) maupun saluran kabel (underground) memiliki impedansi. Besarnya impedansi tergantung dari kondisi saluran transmisi. Sehingga pada proses penyaluran tenaga listrik dapat terjadi beberapa masalah diantaranya jatuh tegangan (voltage drop) akibat impedansi tersebut sesuai hukum Ohm. Terjadi perbedaan tegangan antara sisi pembangkit dan sisi beban. Pada umumnya tegangan pada sisi beban akan turun. Penurunan tegangan bisa terjadi dibawah

tegangan nominal. Hal ini dapat berakibat menurunnya kualitas tegangan pada sisi konsumen, terganggunya operasi peralatan konsumen dan dapat pula meningkatnya rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Analisis masalah ini sudah dilakukan pada saluran transmisi 500kV di Jawa [1][2] dan 70kV di Timor [3]. Ada banyak cara untuk meningkatkan kualitas tegangan pada saluran transmisi AC seperti voltage drop antara lain dengan menurunkan nilai impedansi saluran, mengendalikan tap dari transformer, memasang synchronous condenser, kapasitor bank, atau memasang peralatan mitigasi gangguan tegangan berbasis elektronika daya [4][5]. Pada sistem kelistrikan Flores, perbaikan tegangan diusahakan dengan menggunakan komponen atau peralatan yang ada di sistem sehingga tidak menambah biaya investasi. Berarti, merubah nilai impedansi saluran tidak akan dilakukan, karena sulit untuk mengganti/menambah konduktor saluran. Untuk itu perlu diinvestigasi pengaturan tap dari transformer yang sudah terpasang pada sistem. Dengan menaikkan atau menurunkan transformer tap pada level tertentu, diharapkan terjadi perbaikan tegangan pada bus di sekitar transformer yang juga berpengaruh pada perbaikan tegangan sistem keseluruhan. Yang perlu diperhatikan adalah koordinasi antar tap dari semua transformer agar perbaikan tegangan dapat optimal. Sebelum melakukan upaya perbaikan tegangan, dilakukan analisa kualitas tegangan pada sistem (existing) transmisi tegangan tinggi 70 kV dan 150 kV. Analisa dilakukan dengan simulasi load flow menggunakan software ETAP, untuk mengetahui kondisi tegangan sesuai dengan konfigurasi sistem kelistrikan terpasang. Kemudian, untuk perbaikan tegangan, dilakukan pengaturan tap changer dari semua transformer yang ada di semua Gardu Induk. Kemudian dilakukan lagi simulasi load flow menggunakan ETAP untuk mengetahui apakah voltage drop pada sistem kelistrikan Flores berkurang. Penggunaan ETAP sudah dilakukan untuk analisis sistem kelistrikan pada daerah-daerah di Indonesia [6][7].

II. SISTEM KELISTRIKAN FLORES

A. Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi dalam suatu sistem tenaga listrik merupakan saluran daya listrik dari suatu lokasi ke daerah lain dengan jarak yang cukup jauh, biasanya menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat beban, dengan tegangan tertentu. Berikut ini adalah klasifikasi saluran transmisi dan karakteristiknya [3][4]:

B. Klasifikasi Saluran Transmisi

a. Berdasarkan Pemasangan

Berdasarkan pemasangannya, saluran transmisi dibagi menjadi dua kategori, yaitu: Saluran Udara (Overhead Lines) dan Saluran Kabel Bawah Tanah (Underground Cable). Sistem kelistrikan Flores menggunakan saluran udara.

Peralatan-peralatan pokok yang termasuk di dalam sistem saluran transmisi udara adalah: konduktor (kawat penghantar), menara transmisi (tower), isolator gantung, kawat tanah atas, dan peralatan-peralatan pendukung (tanduk api, damper, dan sebagainya).

b. Berdasarkan Tegangan

Ditinjau dari klasifikasi tegangannya, transmisi listrik dibagi menjadi:

- Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV,
- Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 70kV-150kV,
- Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 70kV-150kV.

c. Berdasarkan Panjang

Berdasarkan panjangnya saluran transmisi dapat di bagi menjadi tiga, yaitu :

- Saluran transmisi pendek (<80 km)
- Saluran transmisi menengah (80-240 km)
- Saluran transmisi panjang (>240 km)

C. Regulasi Tegangan Saluran Transmisi

Saluran transmisi tenaga listrik merupakan rangkaian listrik yang memiliki konstanta yang terbagi rata sepanjang saluran, yang mana terdiri atas: resistansi, induktansi, dan kapasitansi.

a. Resistansi (R)

Nilai resistansi saluran transmisi dipengaruhi oleh resistivitas konduktor dan temperatur. Resistan (R) dari sebuah penghantar sebanding dengan panjang (l) dan berbanding terbalik dengan luas penampangnya (A). Untuk keperluan analisis, resistansi saluran yang panjang ini diperhitungkan sebagai lumped-element.

b. Induktansi (L)

Bila arus AC mengalir pada saluran transmisi, flux magnet yang berubah-ubah terbentuk dan menginduksi konduktor saluran. Timbullah induktansi pada saluran transmisi. Induktansi kawat 3 fasa bisa berlainan untuk masing – masing kawat. Dipilih nilai induktansi dari penghantar yang ditransposisikan, bila ketidakseimbangan antar kawat terjadi.

c. Kapasitansi (C)

Kapasitansi timbul dari dua konduktor yang dipisahkan oleh isolator untuk menyimpan muatan listrik pada tegangan yang diberikan di antara keduanya. Nilai kapasitansi tergantung dari jari-jari konduktor dan jarak antara kedua konduktor tersebut.

d. Regulasi tegangan

Bila saluran transmisi dialiri arus, terjadi jatuh/susut tegangan (voltage drop) pada saluran karena adanya impedansi saluran ($Z = R + jX$) sesuai dengan Hukum Ohm. Bila daya yang mengalir adalah $S = P + jQ$, maka susut tegangan yang terjadi sebesar [8]:

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \tag{1}$$

Pada umumnya, resistansi (R) pada saluran transmisi sangat kecil dibanding dengan induktansi (X) sehingga R dapat diabaikan terhadap X. Dengan demikian persamaan 1 menjadi:

$$\Delta V = \frac{XQ}{V} \tag{2}$$

Dari persamaan 2, terlihat bahwa tegangan sangat dipengaruhi oleh daya reaktif. Daya reaktif akan mempengaruhi faktor daya dan besarnya arus yang mengalir.

Beda tegangan pada ujung saluran transmisi pada kondisi antara beban kosong dan beban penuh disebut regulasi tegangan yang dinyatakan sebagai berikut [2]:

$$\Delta V(\%) = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100\% \tag{3}$$

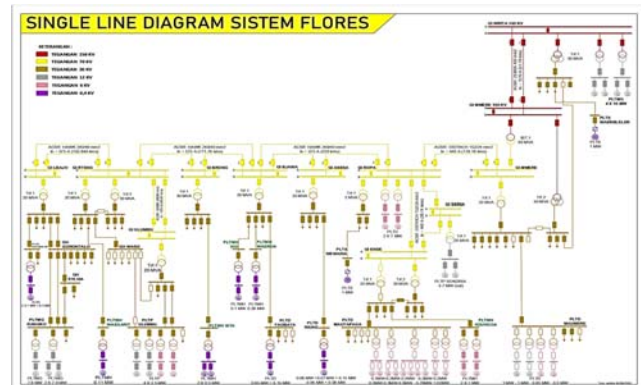
V_S : tegangan pada ujung *sending*.

V_R : tegangan pada ujung *receiving*.

D. Single Line Diagram (SLD)

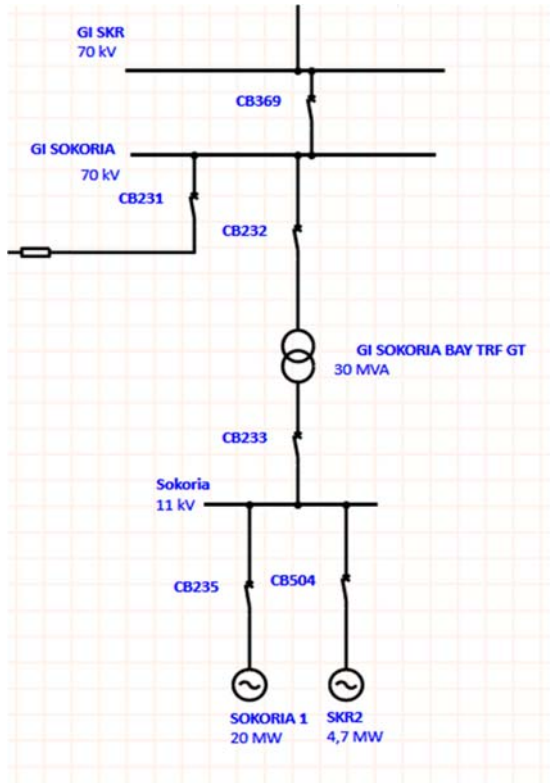
Single Line Diagram (SLD) merupakan suatu diagram listrik yang mewakili peralatan-peralatan listrik terpasang yang telah diganti dengan simbol-simbol tertentu berdasarkan standar internasional. Pembuatan single line diagram ini bertujuan untuk memudahkan dalam melihat sistem kelistrikan yang akan digunakan.

Gambar 1 memperlihatkan SLD sistem kelistrikan Flores yang terdiri dari 11 gardu induk (GI), dan saluran transmisi 150 kV dan 70 kV. Selain itu, SLD ini menunjukkan sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, 12 kV, dan 6,3 kV, serta tegangan rendah 0,4 kV dan pembangkit. Gambar SLD ini juga dilengkapi dengan data komponen sistem kelistrikan Flores 70 kV dan 150 kV yang antara lain meliputi data transmission line, data transformer, data kabel, data pemutus tenaga (PMT) dan komponen lainnya.



Gambar 1. Single Line Diagram Transmisi Sistem Kelistrikan Flores

Untuk menganalisa sistem kelistrikan Flores, SLD pada Gambar 1 dibuat modelnya dalam ETAP agar kemudian dapat dilakukan simulasi. Gambar 2 memperlihatkan sebagian sistem kelistrikan Flores yang sudah dibuat modelnya dalam ETAP yaitu GI Sokoria. Model ini mewakili seluruh komponen yang ada di GI Sokoria, berikut dengan data komponen. Model ini sudah dipastikan kebenarannya berdasarkan data yang dimiliki PT. PLN wilayah kerja Flores.

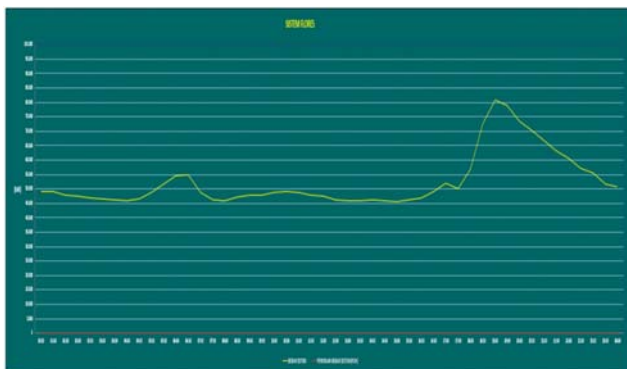


Gambar 2. Model ETAP untuk GI Sokoria.

E. Observasi Kondisi Awal

1. Data Beban

Pada umumnya, kurva beban harian yang dipikul semua pembangkit pada sistem kelistrikan Flores terlihat pada Gambar 3. Untuk keperluan evaluasi sistem kelistrikan ini, kurva beban harian seperti yang terlihat pada Gambar 2 diambil pada tanggal 25 Januari 2023 selama 24 jam. Dari kurva beban harian, terlihat beban maksimum terjadi pada pukul 19.00 waktu setempat.



Gambar 3. Kurva Beban Flores 25 Januari 2023

Pada makala ini, data beban yang digunakan untuk simulasi adalah data beban puncak pada tanggal 25 Januari 2023, yang diambil hanya pada pukul 19.00. Simulasi hanya dilakukan pada satu data ini saja yang dianggap dapat mewakili masalah voltage drop pada sistem. Pertimbangan menggunakan data beban pada jam ini karena merupakan data dengan beban tertinggi sehingga dapat mewakili data beban yang lebih

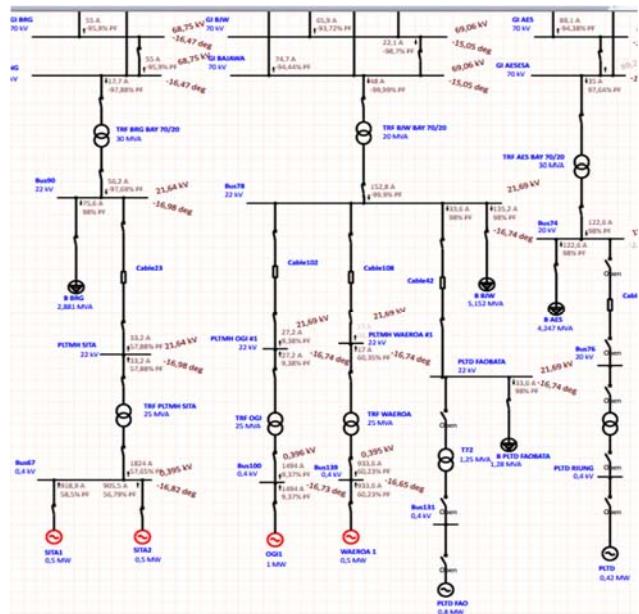
rendah pada jam lainnya. Dianggap jatuh/susut tegangan pada beban yang tertinggi lebih besar dari beban yang lebih rendah. Bila susut tegangan pada beban tertinggi dapat diatasi maka susut tegangan pada beban yang lebih rendah pasti juga dapat diatasi dengan cara yang sama.

2. Hasil Observasi Kondisi Awal

Keadaan mula-mula (awal) sistem adalah sebagai berikut.

- Sistem kelistrikan Flores beroperasi pada keadaan beban puncak (pukul 19.00) dengan daya 81,811 MW.
- Transformer tap dalam posisi 0%
- Terdapat slack bus / swing bus pada bus PLTMG Maumere 2, yang terdiri dari 2 generator swing, dengan masing-masing daya 10,800 kW dan 9,100kW.

Dengan kondisi awal tersebut, simulasi analisa load flow dijalankan. Terlihat hasil simulasi dengan ETAP bahwa ada beberapa generator yang masih bermasalah (Gambar 4) dan ditandai dengan warna merah. Hal ini menunjukkan bahwa generator mengalami over excited yang berakibat faktor daya turun dan arus keluaran berlebih. Faktor daya turun disebabkan oleh tingginya daya reaktif karena arus eksitasi yang tinggi. Hal ini berakibat menurunnya tegangan pada beberapa bus. Terlihat dari Gambar 4, generator SITA1, SITA 2 dan WAEROA1 menyebabkan faktor daya sekitar 0.6, dan generator OGII mengakibatkan faktor daya 0.09. Keterkaitan antara arus eksitasi (atau arus reaktif), faktor daya dan menurunnya tegangan mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem kelistrikan dan dapat menyebabkan jatuhnya tegangan pada bus-bus tertentu dalam sistem tersebut.



Gambar 4. Generator yang Mengalami Keadaan Over Excited pada Saat Simulasi Analisa Load Flow dengan ETAP terhadap Kondisi Awal

Dari hasil simulasi, tegangan pada masing-masing bus baik pada tegangan 70 kV maupun pada tegangan 150 kV terlihat pada Tabel 1. Dari data pada Tabel 1, hampir semua tegangan bus dibawah tegangan nominal (100%). Bahkan ada beberapa bus yang turun/jatuhnya tegangan lebih dari 2%. Hal ini tentunya akan berpengaruh pada susut tegangan di saluran

distribusi hingga di konsumen. Tabel 1 juga menunjukkan susut tegangan pada tiap saluran transmisi karena pengaruh impedansi saluran dan arus yang mengalir pada saluran itu. Susut tegangan terbesar terjadi pada saluran 1 dan 2 – 70 kV MAU-RPA yaitu sebesar 2.15%.

Tabel 1. Nilai tegangan bus dari simulasi ETAP pada kondisi awal

Branch ID	% Bus Voltage		% Drop Voltage
	From	To	
LINE 1 150 KV WAI-MOF	101,0	101,0	0,02
LINE 1 70 KV MAU-RPA	101,8	99,7	2,15
LINE 1 70 KV RTG-LBJ	97,8	97,8	0,00
LINE 1 70 KV RTG-ULB	97,8	97,9	0,16
LINE 2 150 KV WAI-MOF	101,0	101,0	0,02
LINE 2 70 KV MAU-RPA	101,8	99,7	2,15
LINE 2 70 KV RTG-LBJ	97,8	97,8	0,00
LINE 2 70 KV RTG-ULB	97,8	97,9	0,16
LINE 70 KV AES-BJW	99,0	98,7	0,30
LINE 70 KV BJW-BRG	98,7	98,2	0,44
LINE 70 KV BJW-RTG	98,7	97,8	0,89
LINE 70 KV BRG-RTG	98,2	97,8	0,45
LINE 70 KV RPA-AES	99,0	99,7	0,74
LINE 70 KV RPA-BJW	98,7	99,7	1,04
LINE 70 KV RPA-ENE	99,2	99,7	0,49
LINE 70 KV RPA-SKR	99,7	99,5	0,15
LINE 70 KV SKR-ENE	99,2	99,5	0,34

III. ALTERNATIF SOLUSI DAN ANALISA

Alternatif solusi untuk mengurangi turunnya tegangan pada bus-bus di sistem kelistrikan Flores dan susut tegangan pada salurannya diusahakan dengan menggunakan komponen atau peralatan yang ada di sistem kelistrikan sehingga tidak menambah biaya investasi. Karena itu digunakan pengaturan tap pada transformer daya yang ada di semua gardu induk.

Cara kerja pengaturan tap ini sebenarnya mengubah rasio transformasi ($N_1 : N_2$), sehingga tegangan sekunder bervariasi lebih besar atau lebih kecil dari tegangan nominal. Dengan pengaturan tap, tidak hanya mengendalikan tegangan, tetapi juga aliran daya reaktif sesuai dengan persamaan 2. Transformer tap mengkompensasi tidak saja susut tegangan pada impedansi transformer dan saluran transmisi, tetapi juga perubahan tegangan yang masuk pada kumpulan primernya dan perubahan beban.

A. Pengaturan Transformer Tap

Proses simulasi pengaturan ini dilakukan dengan menaikkan tap positif dan tap negatif pada semua transformer yang ada. Dalam hal ini tidak ada penambahan transformer. Saat nilai transformer tap lebih besar dari 0 maka tegangan sekunder akan turun. Jika nilai transformer tap lebih kecil dari 0 maka tegangan sekunder akan naik. Saat naik-turunkan tap dari transformer, batas nilai transformer tap ditentukan dengan melihat aliran daya reaktif sehingga faktor daya yang dihasilkan mendekati nilai = 1 (resistif). Selain faktor daya, kondisi sistem juga dilihat saat arus keluaran generator sesuai dengan kapasitasnya. Bila arus keluaran generator berlebih (overcurrent) maka nilai transformer tap akan diatur lebih kecil

dari 0, sehingga tegangan sekunder naik dan arus keluaran generator turun.

B. Hasil Pengaturan Transformer Tap

Tabel 2. Nilai tegangan bus dari simulasi ETAP pada kondisi transformer tap disesuaikan

Branch ID	% Bus Voltage		% Drop Voltage
	From	To	
LINE 1 150 KV WAI-MOF	102,2	102,3	0,11
LINE 1 70 KV MAU-RPA	105,0	101,7	3,32
LINE 1 70 KV RTG-LBJ	100,0	99,9	0,08
LINE 1 70 KV RTG-ULB	99,9	100,1	0,19
LINE 2 150 KV WAI-MOF	102,2	102,3	0,11
LINE 2 70 KV MAU-RPA	105,0	101,7	3,32
LINE 2 70 KV RTG-LBJ	100,0	99,9	0,08
LINE 2 70 KV RTG-ULB	99,9	100,1	0,19
LINE 70 KV AES-BJW	101,0	100,7	0,29
LINE 70 KV BJW-BRG	100,7	100,2	0,41
LINE 70 KV BJW-RTG	100,7	99,9	0,71
LINE 70 KV BRG-RTG	100,2	99,9	0,31
LINE 70 KV RPA-AES	101,0	101,7	0,73
LINE 70 KV RPA-BJW	100,7	101,7	1,02
LINE 70 KV RPA-ENE	100,6	101,7	1,10
LINE 70 KV RPA-SKR	101,7	100,9	0,82
LINE 70 KV SKR-ENE	100,6	100,9	0,28

Dari hasil simulasi, tegangan pada masing-masing bus baik pada tegangan 70 kV maupun pada tegangan 150 kV terlihat pada Tabel 2. Dari data pada Tabel 2, hampir semua tegangan bus berada pada atau sekitar tegangan nominal (100%). Dibanding dengan Tabel 1, tegangan bus-bus pada Tabel 2 ini lebih tinggi. Pengaturan semua transformer tap berhasil menaikkan tegangan bus-bus ini lebih mendekati tegangan nominal. Hal ini tentunya akan berpengaruh peningkatan tegangan di saluran distribusi hingga di konsumen. Walaupun demikian masih ada tegangan bus yang menjadi perhatian yaitu pada saluran 1 dan 2 – 70 kV MAU-RPA. V_S dari saluran ini tegangannya 105%. Kondisi ini masih dalam batas standar 5% namun perlu diwaspadai dan dipantau agar tidak terjadi kenaikan lagi. Susut tegangan yang terjadi pada saluran 1 dan 2 – 70 kV MAU-RPA yaitu sebesar 3.32%.

IV. KESIMPULAN

Sistem kelistrikan Flores, Nusa Tenggara Timur terdiri dari jaringan transmisi 150 kV dan 70 KV yang dilanjutkan dengan jaringan distribusi 20 kV. Pada kondisi awal, pada umumnya tegangan bus pada sistem ini berada dibawah tegangan nominal. Untuk mengatasi hal ini digunakan metoda perbaikan tegangan yang diusahakan menggunakan komponen atau peralatan yang ada di sistem sehingga tidak menambah biaya investasi. Untuk itu digunakan pengaturan tap dari transformer daya yang ada di gardu induk yaitu pengaturan rasio transformasi. Pengaturan tap dilakukan dengan memperhatikan aliran daya reaktif.

Untuk membuktikan hal ini, telah dilakukan simulasi dengan software ETAP. Single line diagram sistem kelistrikan Flores dibuat modelnya dalam ETAP dan dilakukan analisa load flow. Beban sistem yang digunakan sebesar 81.811 MW. Dari

simulasi dibuktikan bahwa dengan pengaturan tap, tegangan bus berhasil dinaikkan lebih mendekati tegangan nominal. Dengan demikian, secara umum dapat disimpulkan bahwa pengaturan transformer tap berhasil menjaga tegangan pada bus-bus di sistem kelistrikan Flores berada pada tegangan nominal (100%).

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada pihak PT. PLN (Persero) ULTG Flores, Nusa Tenggara Timur yang memungkinkan penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Amir, M., & Winarno, I. A. "Analisis Susut Tegangan Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV". *Sinusoida*, 22(2), 1-9, 2020.
- [2] Sujatmiko, H. "Analisis kerugian daya pada saluran transmisi ekstra tinggi 500 kV di PT PLN (persero) penyaluran & pusat pengaturan beban (P3B) Jawa Bali regional Jawa Tengah & DIY unit pelayanan transmisi Semarang". *Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), 33-52, 2009
- [3] Galla, W. F., Sampeallo, A. S., & Lenjo, A. "Analisis Tegangan Saluran Transmisi 70 kV Pada Sistem Timor Dengan Parameter ABCD". *Media Elektro Journal*, 9(1), 10-19, 2020.
- [4] Mehta, V.K., Principles of Power System, 2001, S. Chand & Company Ltd.
- [5] Tumbelaka, H. H. "Mitigation of supply voltage disturbances with a load voltage-controlled inverter". *Engineering and Applied Science Research*, 48(1), 8-17, 2021.
- [6] Winardi, B., Warsito, A., & Kartika, M. R. "Analisa Perbaikan Susut Teknis dan Susut Tegangan pada Penyulang Kls 06 di GI Kalisari dengan Menggunakan Software Etap 7.5.0". *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 17(3), 135-140, 2015.
- [7] Ilyas, I., Apri, B. A., Supriyadi, E., & Multi, A. "Analisa Aliran Daya Sistem 20 kV pada Proyek Tujuh Bukit Power System menggunakan Software ETAP 12.6". *Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, 32(3), 46-59, 2022.
- [8] Weedy, B. M. et.al., *Electric Power System*, 5th ed. 2012, Wiley