Penyetelan Tap Transformator untuk Mitigasi Undervoltage pada Sistem Smart Grid 10-Bus Menggunakan Analisis Load Flow ETAP

Desi Widyaningsih[1], Muhira Dzar Faraby[2], Rhadi Afdhal Anshari[3], Sofyan Sofyan[4]

[1,3] Program Studi D4 Teknik Listrik, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Indonesia

[2] Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

Correspondent Author : desiwidyaningsih@poliupg.ac.id

***Abstract* — This paper focuses on mitigating undervoltage through transformer tap adjustment in a 10-bus smart grid model simulated using ETAP load flow. Under the initial condition, three buses, namely NET_SS_06B, SS-04B, and SS-05B, operated at 94.9% of nominal voltage, while SS-04A and SS-05A were in the marginal region at 95.5% and 95.7%, respectively. Based on the Alert Summary in the source document, critical and marginal undervoltage limits were set at 95% and 98%, whereas the corresponding overvoltage limits were 105% and 102%. Mitigation was performed by setting the TR_PLN transformer tap to -5% and repeating the load-flow analysis. After adjustment, the operating voltages of NET_SS_06B, SS-04B, SS-05B, SS-04A, and SS-05A became 100.0%, 100.3%, 100.3%, 99.86%, and 99.09%. The average operating voltage of the five buses increased from 95.18% to 99.91%, and no critical undervoltage buses remained. These results indicate that transformer tap adjustment effectively restores the voltage profile of the analyzed system.**

***Keyword* — ETAP, load flow, smart grid, tap changer, undervoltage**

Abstrak — Paper ini memfokuskan analisis pada mitigasi undervoltage melalui penyetelan tap transformator pada model smart grid 10-bus yang disimulasikan menggunakan load flow ETAP. Pada kondisi awal, tiga bus yaitu NET_SS_06B, SS-04B, dan SS-05B beroperasi pada 94,9% tegangan nominal, sedangkan SS-04A dan SS-05A berada pada daerah marginal masing-masing 95,5% dan 95,7%. Berdasarkan Alert Summary pada dokumen sumber, batas kritis dan marginal undervoltage digunakan pada 95% dan 98%, sedangkan batas overvoltage berada pada 105% dan 102%. Mitigasi dilakukan dengan mengubah tap transformator TR_PLN sebesar -5% dan mengulangi analisis aliran daya. Setelah penyetelan, tegangan operasi NET_SS_06B, SS-04B, SS-05B, SS-04A, dan SS-05A menjadi 100,0%, 100,3%, 100,3%, 99,86%, dan 99,09%. Rata-rata tegangan operasi kelima bus meningkat dari 95,18% menjadi 99,91%, atau sebesar 4,73 poin persentase, dan tidak terdapat lagi bus kritis akibat undervoltage. Hasil ini menunjukkan bahwa tap changer merupakan tindakan koreksi yang efektif untuk memulihkan profil tegangan pada sistem yang dianalisis. Sizing kapasitor tetap dibahas sebagai metode kompensasi daya reaktif, tetapi evaluasi kuantitatifnya tidak dijadikan hasil utama karena dokumen sumber tidak melaporkan ukuran kapasitor final maupun perubahan faktor daya sebelum dan sesudah mitigasi.

Kata kunci — ETAP, load flow, smart grid, tap changer, undervoltage

I. PENDAHULUAN

Kualitas tegangan merupakan salah satu indikator utama keandalan sistem distribusi. Perubahan pembebanan, konfigurasi jaringan, dan kebutuhan daya reaktif dapat menyebabkan tegangan pada bus turun di bawah rentang operasi yang diizinkan. Kondisi undervoltage meningkatkan risiko penurunan performa peralatan dan dapat memperbesar arus pada jaringan, sehingga analisis aliran daya diperlukan untuk mengidentifikasi bus kritis dan menentukan tindakan korektif yang tepat [1]–[3].

Dua perangkat yang umum digunakan untuk memperbaiki kondisi tersebut adalah tap changer transformator dan capacitor bank. Tap changer mengubah rasio transformasi untuk mengatur level tegangan di sisi sekunder, sedangkan capacitor bank menyuplai daya reaktif agar arus reaktif dari sumber berkurang dan power factor meningkat [1], [4]–[6]. Efektivitas kedua tindakan tersebut sangat bergantung pada lokasi, kondisi beban, dan parameter pengaturan yang dipilih.

Studi pada dokumen sumber memodelkan smart grid 10-bus di ETAP dan melaporkan tiga bus dengan tegangan 94,9% serta dua bus lain pada daerah marginal di sekitar 95% [1]. Sumber juga menjelaskan prosedur sizing capacitor bank, tetapi hasil kuantitatif yang tersedia secara lengkap untuk sistem uji adalah perubahan profil tegangan setelah TR_PLN diatur pada tap -5%. Karena itu, paper ini mempersempit pembahasan pada pengaruh penyetelan tap transformator terhadap pemulihan profil tegangan, sementara capacitor sizing dipertahankan sebagai metode kompensasi pendukung tanpa mengklaim hasil yang tidak dilaporkan.

Tujuan paper ini adalah: (1) mengidentifikasi bus yang berada pada kondisi kritis dan marginal berdasarkan hasil load flow, (2) menjelaskan prosedur penyetelan tap TR_PLN, dan (3) mengevaluasi perubahan tegangan bus sebelum dan sesudah penyetelan. Kinerja mitigasi dinilai dari jumlah bus kritis, tegangan minimum, dan perubahan rata-rata tegangan pada lima bus yang dilaporkan bermasalah.

II. METODOLOGI

Penelitian sumber menggunakan pendekatan simulasi kuantitatif berbasis ETAP. Model jaringan memuat sumber GRID_PLN, generator lokal, PV, transformator, circuit breaker, bus, beban terkonsentrasi, motor, serta perangkat

kompensasi. Analisis dilakukan dengan load flow untuk memperoleh tegangan bus dan mengevaluasi kondisi operasi sebelum dan sesudah tindakan mitigasi [1].

A. Kriteria Evaluasi Tegangan

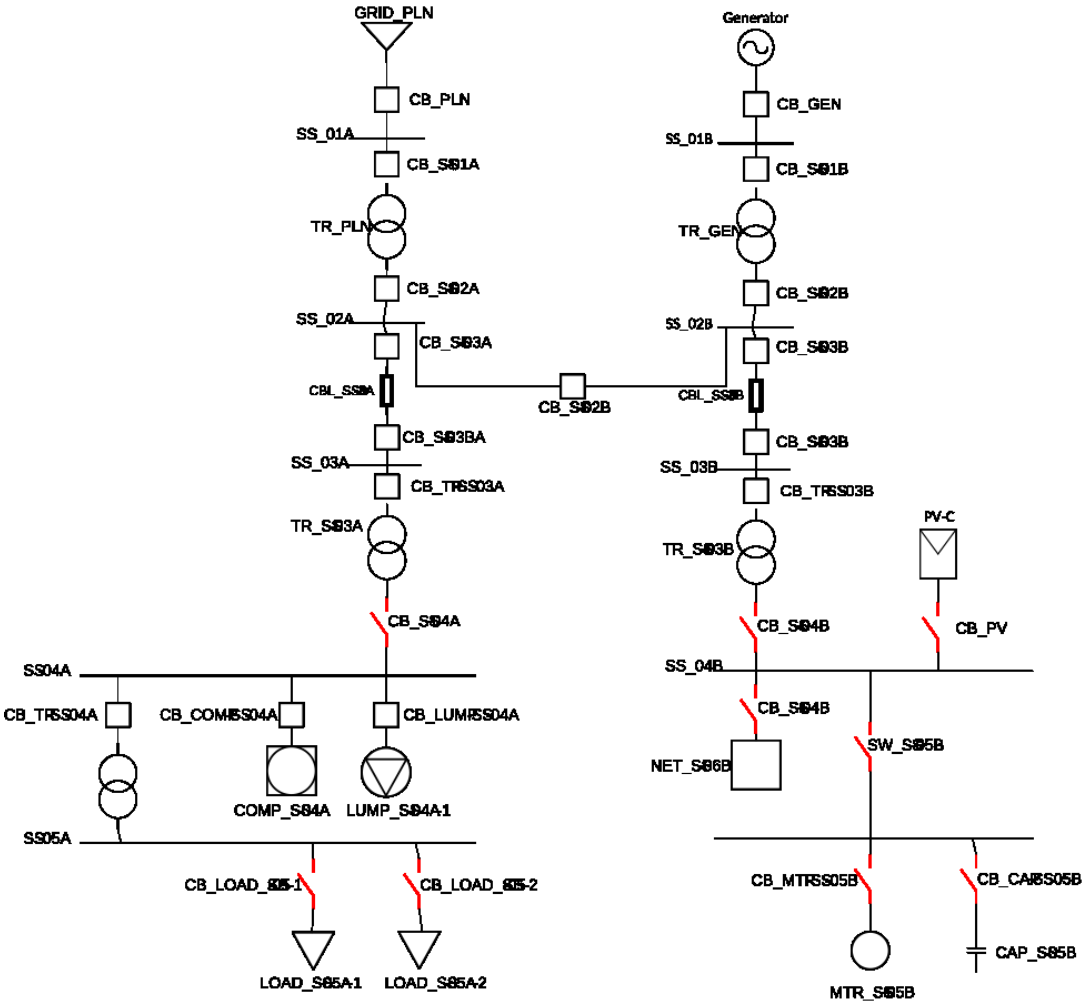
Dokumen sumber menggunakan Alert Summary Report ETAP untuk mengelompokkan kondisi tegangan. Ambang kritis undervoltage ditetapkan pada 95% tegangan nominal dan ambang marginal pada 98%. Untuk overvoltage, ambang kritis dan marginal masing-masing 105% dan 102%. Dengan kriteria ini, bus di bawah 95% diperlakukan sebagai bus yang memerlukan tindakan koreksi, sedangkan bus antara 95% dan 98% memerlukan pemantauan [1].

B. Model Sistem Smart Grid

Single line diagram menunjukkan jaringan hibrida dengan pasokan dari GRID_PLN pada sisi kiri dan generator serta PV pada sisi kanan. Kedua bagian sistem saling terhubung melalui jalur interkoneksi di area SS_03A–SS_08B. TR_PLN berada pada jalur sumber PLN dan menjadi perangkat yang disetel untuk memperbaiki level tegangan. Bus yang dilaporkan bermasalah tersebar pada SS-04A, SS-05A, NET_SS_06B, SS-04B, dan SS-05B [1].

TABEL I
PARAMETER EVALUASI DAN SKENARIO SIMULASI

Parameter	Nilai/Keterangan
Metode studi	Load flow ETAP
Sistem uji	Smart grid 10-bus
Undervoltage kritis	< 95% tegangan nominal
Undervoltage marginal	95%–98%
Overvoltage marginal/kritis	>102% / >105%
Transformator target	TR_PLN
Perubahan tap	-5%



Gambar 1. Single line diagram smart grid yang digunakan pada simulasi load flow ETAP.

C. Model Penyetelan Tap Transformator

Secara ideal, hubungan tegangan primer dan sekunder transformator mengikuti rasio lilitan. Perubahan posisi tap mengubah rasio efektif sehingga tegangan sekunder dapat dinaikkan atau diturunkan tanpa mengubah tegangan sumber. Hubungan dasar rasio tegangan dan lilitan ditunjukkan pada (1).

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

dengan V_1 dan V_2 adalah tegangan primer dan sekunder, sedangkan N_1 dan N_2 adalah jumlah lilitan efektif pada sisi primer dan sekunder. Dalam prosedur ETAP pada sumber, nilai tap diturunkan ketika terjadi undervoltage sehingga tegangan sekunder meningkat. Untuk kasus yang dianalisis, TR_PLN disetel sebesar -5% lalu load flow dijalankan kembali [1].

D. Sizing Capacitor Bank sebagai Kompensasi Pendukung

Sumber juga memasukkan capacitor bank sebagai opsi mitigasi untuk mengurangi kebutuhan daya reaktif dan meningkatkan power factor. Kebutuhan daya reaktif capacitor bank untuk memperbaiki power factor dari kondisi awal ke target dihitung menggunakan (2).

$$Q_c = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (2)$$

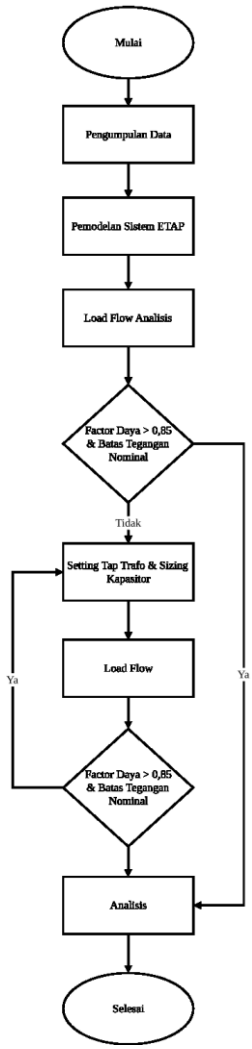
dengan P adalah daya aktif beban, φ_1 adalah sudut faktor daya awal, dan φ_2 adalah sudut faktor daya target. Sudut faktor daya pada (2) diperoleh menggunakan (3).

$$\varphi = \cos^{-1}(\mathrm{PF}) \quad (3)$$

Sebagai ilustrasi, sumber menghitung beban 1000 kW dengan power factor awal 0,8 dan target 0,95 sehingga diperoleh kebutuhan sekitar 422 kVAR [1]. Namun, dokumen sumber tidak melaporkan ukuran capacitor bank final yang diterapkan pada sistem 10-bus maupun nilai power factor sebelum dan sesudah mitigasi. Oleh sebab itu, paper ini tidak menggunakan capacitor sizing sebagai indikator hasil utama.

E. Prosedur Simulasi

Prosedur dimulai dari pengumpulan data dan pemodelan sistem di ETAP, dilanjutkan load flow untuk mengidentifikasi profil tegangan dan power factor. Jika kriteria belum terpenuhi, dilakukan setting tap transformator dan/atau sizing capacitor, kemudian load flow diulang hingga tegangan berada pada rentang yang dapat diterima. Hasil akhir dianalisis dengan membandingkan profil tegangan sebelum dan sesudah mitigasi [1].



Gambar 2. Alur mitigasi undervoltage dan perbaikan power factor pada dokumen sumber.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Kondisi Awal Profil Tegangan

Hasil load flow awal mengidentifikasi tiga bus kritis dengan tegangan yang sama, yaitu NET_SS_06B, SS-04B, dan SS-05B pada 94,9% tegangan nominal. SS-04A dan SS-05A masing-masing berada pada 95,5% dan 95,7%. Walaupun tabel sumber memberi label undervoltage pada kelima bus, narasi dan ambang Alert Summary menempatkan dua bus terakhir pada kategori marginal karena nilainya masih di atas 95% [1].

TABEL II
PROFIL TEGANGAN SEBELUM PENYETELAN TAP

Bus	Operasi	Evaluasi
NET_SS_06B	94,9%	Kritis
SS-04B	94,9%	Kritis
SS-05B	94,9%	Kritis
SS-04A	95,5%	Marginal
SS-05A	95,7%	Marginal

Tegangan minimum kondisi awal adalah 94,9%. Karena tiga bus berada di bawah batas kritis 95%, tindakan koreksi diperlukan. Pemilihan TR_PLN sebagai target tap memungkinkan perubahan rasio tegangan dari sisi pasokan PLN dan memengaruhi profil tegangan pada jaringan yang terinterkoneksi.

B. Perubahan Profil Tegangan Setelah Tap -5%

Setelah TR_PLN disetel pada -5% dan load flow dijalankan kembali, seluruh bus yang sebelumnya kritis atau marginal berada pada rentang nominal. NET_SS_06B meningkat menjadi 100,0%, SS-04B dan SS-05B menjadi 100,3%, SS-04A menjadi 99,86%, dan SS-05A menjadi 99,09% [1].

TABEL III
PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH MITIGASI

Bus	Sebelum	Sesudah	Δ
NET_SS_06B	94,9%	100,0%	+5,10
SS-04B	94,9%	100,3%	+5,40
SS-05B	94,9%	100,3%	+5,40
SS-04A	95,5%	99,86%	+4,36
SS-05A	95,7%	99,09%	+3,39

Peningkatan terbesar terjadi pada SS-04B dan SS-05B, masing-masing 5,40 poin persentase. Peningkatan terkecil terjadi pada SS-05A sebesar 3,39 poin persentase, tetapi nilai akhirnya tetap 99,09% dan berada jauh di atas batas kritis. Rentang tegangan akhir 99,09%–100,3% menunjukkan bahwa tindakan koreksi tidak menghasilkan overvoltage pada lima bus yang dievaluasi.

C. Ringkasan Efektivitas Mitigasi

Untuk melihat dampak keseluruhan, nilai lima bus diringkas menjadi indikator minimum, rata-rata, dan jumlah bus kritis. Rata-rata operasi dihitung langsung dari data tabel sebelum dan sesudah mitigasi. Nilai rata-rata meningkat dari 95,18% menjadi 99,91%, sedangkan jumlah bus kritis turun dari tiga menjadi nol.

TABEL IV
RINGKASAN KINERJA SEBELUM DAN SESUDAH PENYETELAN

Indikator	Sebelum	Sesudah
Tegangan minimum	94,9%	99,09%
Rata-rata 5 bus	95,18%	99,91%
Bus kritis (<95%)	3 bus	0 bus
Bus marginal (95–98%)	2 bus	0 bus

Perubahan tersebut menunjukkan bahwa penyetelan tap tidak hanya mengangkat bus yang berada tepat di bawah 95%, tetapi juga memindahkan bus marginal ke sekitar nilai nominal. Secara praktis, tap changer memberikan koreksi tegangan yang menyebar pada jaringan terinterkoneksi tanpa memerlukan perubahan topologi sistem.

D. Evaluasi terhadap Perbaikan Power Factor

Judul dokumen sumber mencakup perbaikan power factor melalui sizing capacitor. Akan tetapi, bagian hasil yang tersedia tidak memberikan nilai power factor sebelum dan sesudah mitigasi serta tidak menyebut ukuran capacitor bank final yang dipasang pada sistem 10-bus. Tabel pascamitigasi memang diberi judul setelah tap trafo dan sizing kapasitor, namun narasi hasil secara eksplisit menyatakan bahwa setelah TR_PLN ditapping tidak ada lagi bus yang undervoltage [1].

Dengan keterbatasan tersebut, kesimpulan kuantitatif yang dapat dipertanggungjawabkan dari data sumber adalah efektivitas penyetelan tap terhadap profil tegangan. Persamaan sizing capacitor tetap relevan sebagai prosedur desain, tetapi pengaruhnya terhadap power factor dan rugi-rugi daya memerlukan data tambahan seperti P, Q, power factor tiap bus, ukuran capacitor yang dipilih, serta hasil load flow setelah capacitor diaktifkan.

IV. KESIMPULAN

Analisis load flow ETAP pada smart grid 10-bus menunjukkan tiga bus kritis, yaitu NET_SS_06B, SS-04B, dan SS-05B, dengan tegangan 94,9%, serta dua bus marginal pada 95,5% dan 95,7%. Penyetelan tap TR_PLN sebesar -5% meningkatkan kelima nilai tersebut menjadi 99,09%–100,3%. Tegangan minimum meningkat dari 94,9% menjadi 99,09%, rata-rata lima bus meningkat dari 95,18% menjadi 99,91%, dan jumlah bus kritis berkurang dari tiga menjadi nol.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa tap changer merupakan metode yang efektif untuk memulihkan profil tegangan pada sistem yang dianalisis. Sizing capacitor bank secara teoritis dapat digunakan untuk perbaikan power factor, namun dokumen sumber belum menyediakan hasil kuantitatif yang cukup untuk menilai keberhasilannya pada sistem 10-bus. Karena itu, evaluasi paper ini difokuskan pada mitigasi undervoltage yang dapat diverifikasi langsung dari data sebelum dan sesudah penyetelan tap.

DAFTAR ACUAN

[1] M. D. Faraby, M. H. Isrofil, I. T. Wasistha, A. Rahmat, S. Linggi' Allo, and Yusdar, "Perbaikan Power Factor Dengan Setting Tap Changer Dan Sizing Capasitor Pada Sistem Smartgrid," Journal FORTEI-JEERI, manuscript provided.

[2] A. R. Sultan, "Analisis Kualitas Daya dan Studi," Teknik Elektro PNUP, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2017.

[3] E. R. Ibrahim, "Studi Undervoltage dan Pengaruhnya terhadap Kualitas Tegangan pada Sistem Distribusi," Jurnal Teknik Elektro PNUP, vol. 6, no. 1, pp. 30–38, 2018.

[4] A. Rizal and A. R. Idris, "Perbaikan Faktor Daya dengan Kapasitor Bank pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik," Jurnal Teknik Elektro dan Informatika PNUP, vol. 7, no. 3, pp. 60–68, 2019.

[5] I. H. M. Amir and M. E. A. M. Somantri, "Pengaturan Tap Changer pada Transformator untuk Menjaga

Kestabilan Tegangan," Jurnal Sinusoida PNUP, vol. 4, no. 2, pp. 15–23, 2017.

[6] F. A. Noor, "Integrasi Pembangkit Terdistribusi dan Optimalisasi Sistem Distribusi Tenaga Listrik," Jurnal Teknik Elektro PNUP, vol. 6, no. 4, pp. 75–83, 2018.

[7] A. R. Sultan and E. R. Ibrahim, "Simulasi Load Flow dan Penentuan Ukuran Kapasitor Bank untuk Sistem Distribusi," Jurnal Teknik Elektro PNUP, vol. 7, no. 1, pp. 40–49, 2019.

[8] B. Choirawa, F. Pujiyanto, and M. A. L. Pambudi, "Analisis Gangguan Undervoltage dalam Instalasi Jaringan Power Listrik Kapal," Majalah Ilmiah Bahari Jogja, vol. 21, no. 2, Jul. 2023.

[9] A. R. Sultan, "Analisis Kualitas Daya pada Perbaikan Cos φ Instalasi," Jurnal Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2017.

[10] A.R. Sultan, "Analisis Penempatan Kapasitor Bank pada IEEE 69-Bus Sistem Distribusi untuk Perbaikan Faktor Daya dan Tegangan," Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI), 2023.

[11] A.R. Sultan, "Analisa Pengoperasian Tap Changer Transformator pada Gardu Induk," Repository Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2021.