

Analisa Kestabilan Transien PLTMH Waeroa Terinterkoneksi SUTM 20 KV Penyulang Golewa

Acintyani Minciana Darma¹, Frans J. Likadja^{2*}, Agustinus S. Sampeallo³

^{1,2,3} Prodi Teknik Elektro/ Fakultas Sains dan Teknik/ Universitas Nusa Cendana

*Corresponding author, email: frans.likadja@staf.undana.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kestabilan transien PLTMH Waeroa berkapasitas 385 kW yang terinterkoneksi melalui SUTM 20 kV Penyulang Golewa, guna menjamin keandalan sistem tenaga listrik PT. PLN (Persero) ULP Bajawa. Penelitian dilakukan dengan memodelkan jaringan distribusi 20 kV Penyulang Golewa dan mensimulasikan kestabilan transien akibat gangguan hubung singkat 3 fasa menggunakan ETAP 19.0.1, pada kondisi siang dan malam hari, sebelum dan sesudah PLTMH Waeroa terinterkoneksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum PLTMH terhubung, tegangan bus stabil pada 20 kV, frekuensi tetap pada 100% (50 Hz), dan sudut tegangan bus stabil pada $-0,49^\circ$, baik siang maupun malam hari. Setelah PLTMH terhubung, tegangan bus tetap stabil pada 20 kV, frekuensi berosilasi teredam dengan nilai maksimum 100,45% (50,225 Hz) dan minimum 99,63% (49,815 Hz) sebelum kembali ke 100%, sementara sudut tegangan bus turun ke $-0,27^\circ$ pada siang hari dan $-0,15^\circ$ pada malam hari sebelum stabil kembali di sekitar $-0,43^\circ$ hingga $-0,44^\circ$ pada akhir simulasi. Seluruh parameter yang diamati kembali ke kondisi *steady-state* dalam waktu singkat, menunjukkan bahwa interkoneksi PLTMH Waeroa tidak mengganggu kestabilan transien sistem distribusi Penyulang Golewa.

INFO.

Info. Artikel:

No. 040

Received. July 02, 2026

Revised. July 24, 2026

Accepted. August 12, 2026

Page. 42 – 53

Kata kunci:

- ✓ Kestabilan Transien
- ✓ Tegangan, Frekuensi
- ✓ Sudut Tegangan Bus
- ✓ ETAP 19.0.1

Abstract

This study analyzes the transient stability of the 385 kW Waeroa Micro-hydro Power Plant (PLTMH) interconnected through the 20 kV Golewa Feeder Medium Voltage Overhead Line (SUTM), to ensure the reliability of the power system operated by PT. PLN (Persero) ULP Bajawa. The study modeled the 20 kV Golewa Feeder distribution network and simulated transient stability under a three-phase short-circuit disturbance using ETAP 19.0.1, for daytime and nighttime conditions before and after PLTMH interconnection. Results show that before the PLTMH was connected, the bus voltage remained stable at 20 kV, the frequency stayed at 100% (50 Hz), and the bus voltage angle was stable at -0.49° , in both conditions. After connection, the bus voltage remained stable at 20 kV, the frequency oscillated in a damped pattern between 100.45% (50.225 Hz) and 99.63% (49.815 Hz) before returning to 100%, while the bus voltage angle decreased to -0.27° in daytime and -0.15° at night before stabilizing near -0.43° to -0.44° . All parameters returned to steady-state within a short time, indicating that the PLTMH Waeroa interconnection does not compromise the transient stability of the Golewa Feeder distribution system.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri[1]. Indonesia merupakan salah satu negara yang kaya akan sumber daya alamnya. Sumber daya air merupakan kebutuhan dasar hidup manusia[2]. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Waeroa merupakan salah satu contoh pemanfaatan energi terbarukan di daerah Bajawa, yang berpotensi memberikan kontribusi signifikan dalam memenuhi kebutuhan listrik lokal. PLTMH Waeroa adalah salah satu unit PLTMH yang terletak di desa Nuamuzi, Kecamatan Golewa, Kabupaten Ngada, Provinsi Nusa Tenggara Timur. PLTMH Waeroa menghasilkan daya sebesar 385 KW[3].

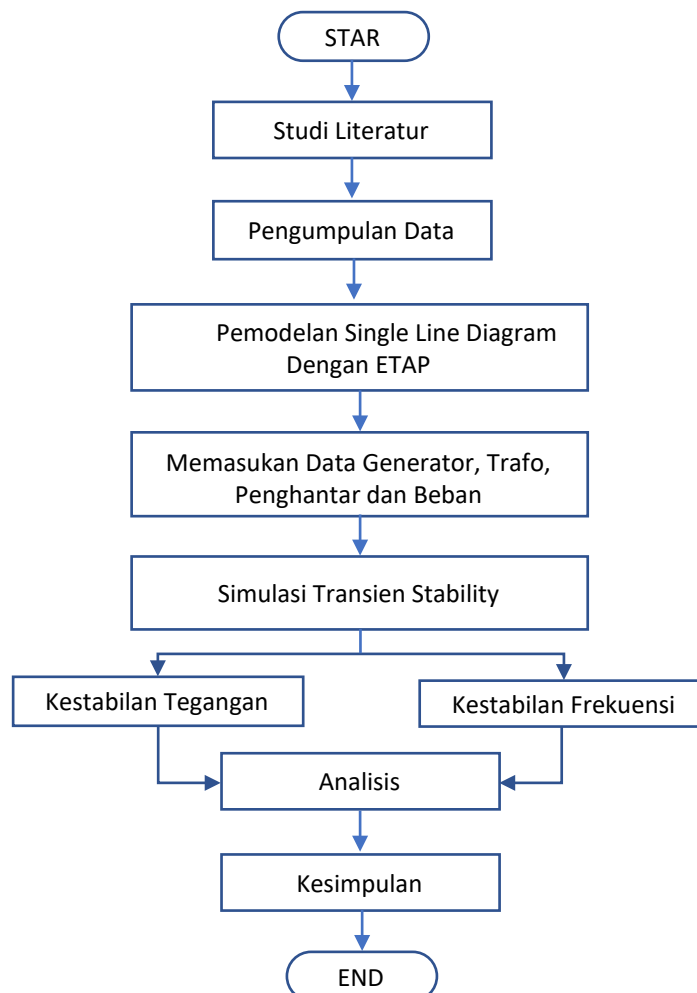
Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*) dan kestabilan tegangan (*Voltage Stability*)[4]. Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Suatu sistem dikatakan stabil bila terdapat keseimbangan antara daya beban atau daya output listrik[5]. Daya output listrik berpengaruh pada kestabilan frekuensi

yang didapat ketika sebuah beban dilakukannya penambahan beban dan ketika terjadinya gangguan pada jaringan listrik[4]. Frekuensi dapat berubah naik turun tergantung pada gangguan yang terjadi pada jaringan listrik termasuk gangguan Transien [6] Kestabilan peralihan (*Transien stability*) adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan setelah mengalami gangguan yang besar, sehingga sistem kehilangan stabilitas karena gangguan yang terjadi diluar kemampuan sistem tersebut [7].

Gangguan Transien sangat mempengaruhi stabilitas dari suatu sistem tenaga Listrik. Oleh karena itu, analisis kestabilan Transien menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa PLTMH dapat beroperasi secara stabil dan aman saat terjadi gangguan[8].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah metode deskriptif kuantitatif yang menjelaskan tentang kestabilan Transien dari hasil simulasi pada *software* ETAP 19.0.1.[9] Dengan menggunakan skenario interkoneksi PLTMH ke jaringan distribusi, yakni saat kondisi sebelum PLTMH Waeroa terhubung ke sistem PLN penyulang 2 Golewa, kondisi sesudah PLTMH Waeroa terhubung ke sistem PLN penyulang 2 Golewa menggunakan satu unit generator, serta bagaimana dampaknya terhadap sistem distribusi 20 kV di Bajawa.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

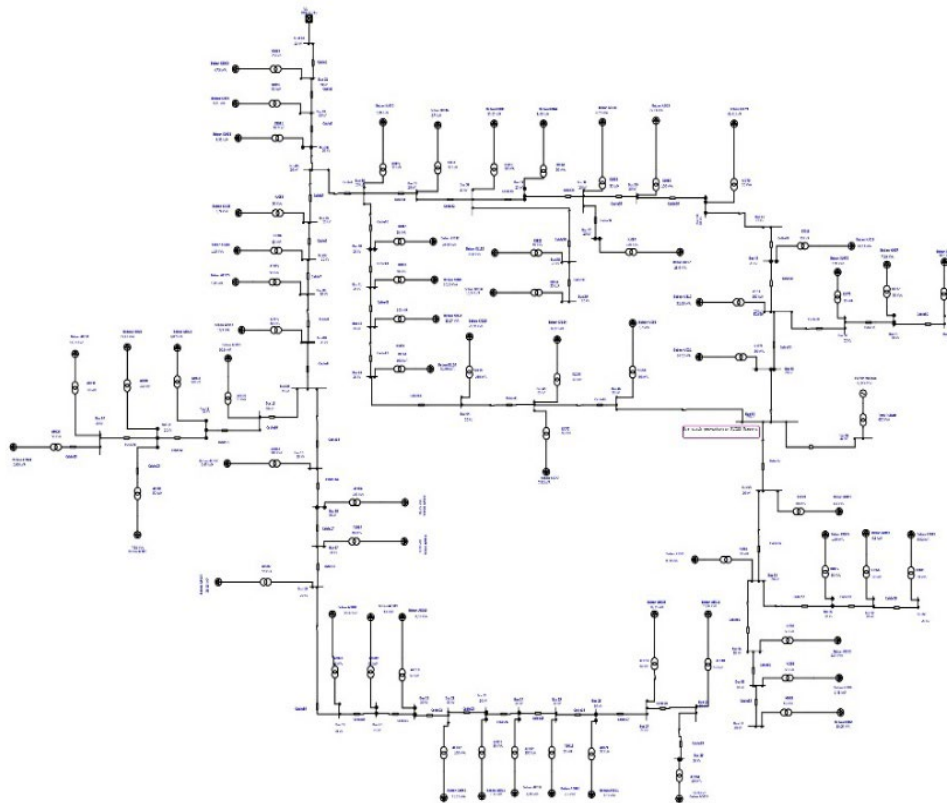
Gambar 1 diagram alir (*flowchart*) tersebut merincikan metodologi penelitian analisis stabilitas sistem tenaga listrik yang dimulai dari tahapan Start, kemudian dilanjutkan dengan Studi Literatur dan Pengumpulan Data yang mencakup data jaringan, generator, transformator, penghantar, serta data beban.

Selanjutnya dilakukan Pemodelan Single Line Diagram menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1[4], kemudian memasukkan data generator, trafo, penghantar, dan beban sesuai kondisi sistem yang diteliti. Setelah model sistem selesai, dilakukan Simulasi *Transient Stability* untuk mengetahui respon sistem saat terjadi gangguan. Hasil simulasi kemudian dievaluasi melalui tiga parameter utama, yaitu Kestabilan Tegangan, Kestabilan Frekuensi, dan Kestabilan Sudut Tegangan Bus[9]. Ketiga parameter tersebut selanjutnya diolah pada tahap Analisis untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi kestabilan sistem. Berdasarkan hasil analisis tersebut, penelitian dilanjutkan pada tahap Kesimpulan, dan diakhiri dengan End sebagai penanda selesainya seluruh prosedur penelitian.

Teknik Analisis Data

1. Pemodelan *Single Line Diagram* SUTM 20 kV Penyulang Golewa

One-Line Diagram - OLV1 (Transient Stability Analysis)



page 1 19:16:02 Jul 28, 2025 Project File: Golewa

Gambar 2. Pemodelan *Single Line Diagram* SUTM 20 kV Penyulang Golewa

Gambar diatas menunjukkan bahwa terdapat 2 supply arus pada Penyulang Golewa, yaitu dari Gardu Induk Bajawa dan PLTMH Waeroa. Data beban pada gardu induk 5,007 MW dan PLTMH Waeroa dengan daya terpasang 385 kW atau 0,385 MW.

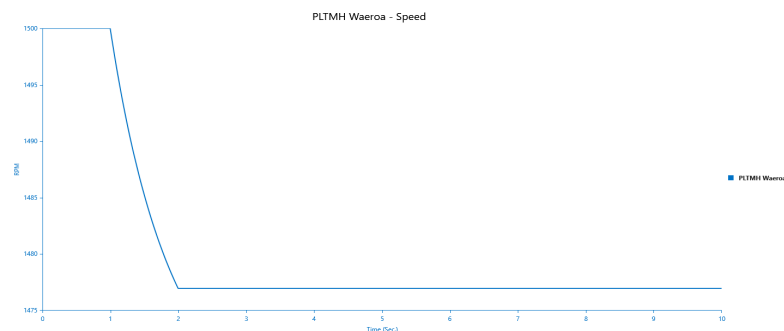
HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Kestabilan Transien

Kestabilan transien terkait dengan interkoneksi PLTMH Waeroa dengan SUTM 20 kV Penyulang Golewa sangat penting agar dapat mengetahui bagaimana keandalan sistem tersebut apabila terjadi sebuah gangguan. Simulasi kestabilan Transien dilakukan untuk mengetahui stabilitas transien pada PLTMH Waeroa yang terinterkoneksi dengan SUTM 20 kV Penyulang Golewa saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa. Simulasi kestabilan transien dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada siang dan malam.

Simulasi Kondisi Siang Hari Sebelum PLTMH Waeroa Masuk

Simulasi kestabilan Transien terkait interkoneksi PLTMH pada SUTM 20 kV pada kondisi siang hari sebelum PLTMH Waeroa masuk yaitu sebagai berikut. Pada kondisi ini dirancang terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa .

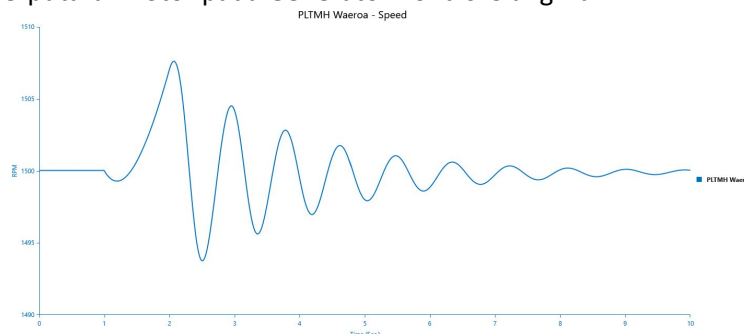


Gambar 3. Grafik Kecepatan Generator Sebelum PLTMH Masuk pada Kondisi Siang Hari

Gambar 3 memperlihatkan bahwa kecepatan generator dari detik ke-0 hingga sekitar detik ke-2 berada pada nilai 1500 RPM. Namun setelah detik ke-2, terjadi penurunan yang sangat drastis dari 1500 RPM hingga 1477 RPM. Setelah terjadi penurunan tersebut, kecepatan kemudian kembali stabil pada nilai 1477 RPM, dan mempertahankan nilai tersebut hingga detik ke-10. Hal ini menunjukkan sistem mengalami gangguan sesaat, yang menyebabkan rotor mengalami sedikit penurunan kecepatan rotor akibat ketidakseimbangan antara torsi mekanik turbin dan torsi elektromagnetik generator. Setelah itu, sistem kembali mencapai kondisi stabil di mana kecepatan rotor tetap konstan.

Simulasi Kondisi Siang Hari Sesudah PLTMH Waeroa Masuk

- Grafik Kecepatan Perputaran Rotor pada Generator Kondisi Siang Hari



Gambar 4. Grafik Kecepatan Generator Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Siang Hari

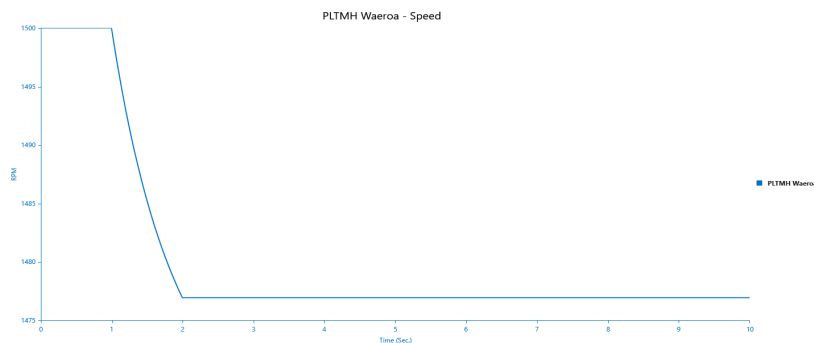
Berdasarkan gambar 4, kecepatan generator pada detik ke-0 hingga detik ke-1 stabil pada nilai 1500 RPM. Setelah detik ke-1, terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan kecepatan mulai berosilasi. Puncak percepatan tertinggi terjadi pada detik ke-2 mencapai nilai sekitar 1508 RPM, diikuti dengan puncak perlambatan pada sekitar detik ke-2.5, mencapai nilai 1494 RPM. Osilasi kecepatan ini kemudian menjadi teredam (*Damped Oscillation*), di mana amplitudo fluktuasi secara bertahap mengecil seiring berjalannya

waktu. Osilasi yang teredam menunjukkan bahwa sistem memiliki stabilitas dinamis yang memadai dan berhasil mengembalikan kecepatan generator. Menjelang akhir simulasi pada detik ke-10, kecepatan generator kembali mendekati dan stabil pada nilai 1500 RPM, yang merupakan nilai kecepatan *steady-state* awal.

Simulasi Kondisi Malam Hari Sebelum PLTMH Masuk

Simulasi kestabilan Transien terkait interkoneksi PLTMH pada SUTM 20 kV pada kondisi siang hari yaitu sebagai berikut. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kestabilan transien pada PLTMH Waeroa yang terinterkoneksi dengan SUTM 20 kV Penyulang Golewa pada kondisi malam hari sebelum terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa.

- Grafik Kecepatan Perputaran Rotor pada Generator Kondisi Malam Hari



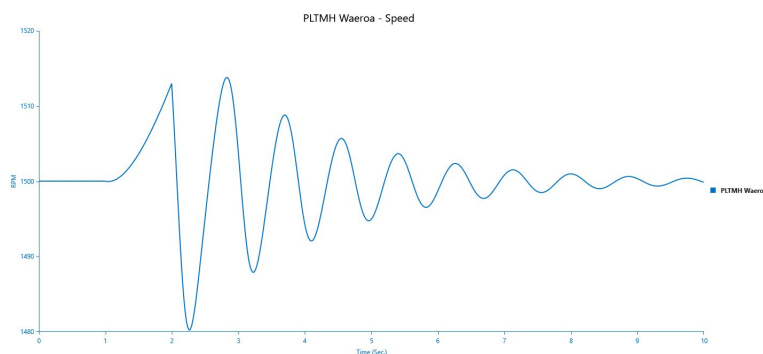
Gambar 5. Grafik Kecepatan Generator Sebelum PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Seperti terlihat pada gambar 5, kecepatan generator dari detik ke-0 hingga sekitar detik ke-2 berada pada nilai 1500 RPM. Namun setelah detik ke-2, terjadi penurunan yang sangat drastis dari 1500 RPM hingga 1477 RPM. Setelah terjadi penurunan tersebut, kecepatan kemudian kembali stabil pada nilai 1477 RPM, dan mempertahankan nilai tersebut hingga detik ke-10. Hal ini menunjukkan sistem mengalami gangguan sesaat, yang menyebabkan rotor mengalami sedikit penurunan kecepatan akibat ketidakseimbangan antara torsi mekanik turbin dan torsi elektromagnetik generator. Setelah itu, sistem kembali mencapai kondisi stabil di mana kecepatan generator tetap konstan.

Simulasi Kondisi Malam Hari Sesudah PLTMH Masuk

Simulasi kestabilan Transien terkait interkoneksi PLTMH pada SUTM 20 kV pada kondisi siang hari yaitu sebagai berikut. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kestabilan transien pada PLTMH Waeroa yang terinterkoneksi dengan SUTM 20 kV Penyulang Golewa pada kondisi malam hari sesudah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa.

- Grafik Kecepatan Perputaran Rotor pada Generator Kondisi Malam Hari



Gambar 6. Grafik Kecepatan Generator Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Grafik pada gambar 6 memperlihatkan bahwa kecepatan generator pada detik ke-0 hingga detik ke-1 stabil pada nilai 1500 RPM. Pada detik ke-2 hingga detik ke-3, terjadi osilasi kecepatan yang cukup

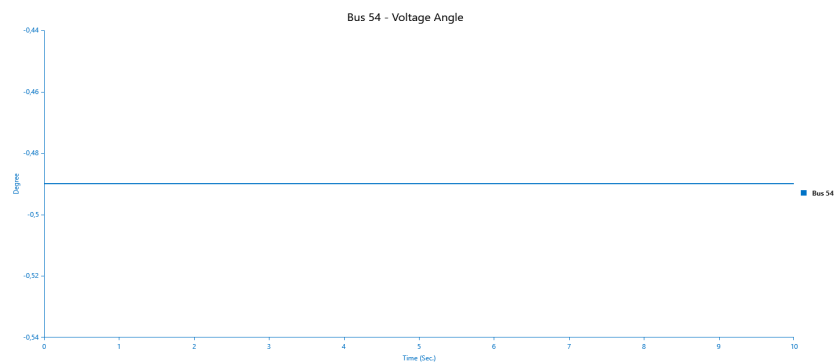
signifikan, di mana kecepatan melonjak hingga mencapai puncaknya pada nilai sekitar 1512 RPM dan kemudian menurun secara drastis pada nilai terendah yaitu 1400 RPM. Selanjutnya, kecepatan mulai menunjukkan osilasi teredam (*damped Oscillation*), di mana amplitudo osilasi berangsur-angsur mengecil seiring berjalannya waktu. Osilasi yang teredam ini mengindikasikan bahwa sistem stabil secara dinamis, berhasil menahan gangguan tersebut. Pada detik ke-10 kecepatan generator mencapai nilai stabil, yaitu 1500 RPM, yang merupakan nilai kecepatan *steady-state* awalnya.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Siang Hari

Grafik simulasi kestabilan transien di titik penyambungan Penyulang Golewa pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV pada siang hari dibagi menjadi dua, yaitu sebelum PLTMH masuk dalam sistem distribusi Bajawa dan sesudah PLTMH masuk dalam sistem distribusi Bajawa.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Siang Hari Sebelum PLTMH Golewa Masuk

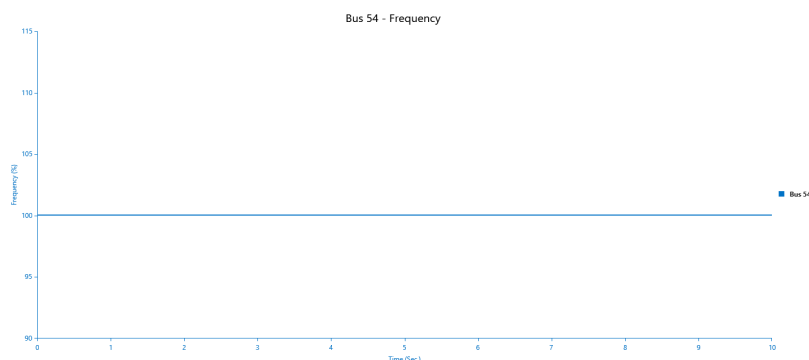
- Grafik Sudut Tegangan Bus



Gambar 7. Grafik Sudut Tegangan Bus Kondisi Siang Hari Sebelum PLTMH Golewa Masuk

Hasil simulasi ETAP 19.0.1 pada gambar 7 menunjukkan bahwa sudut tegangan pada bus penyambungan menunjukkan pada detik ke-0 hingga detik ke-10 berada pada nilai sekitar -0,49°. Sepanjang keseluruhan periode pengamatan dari detik ke-0 hingga detik ke-10, tidak terjadi perubahan pada sudut tegangan. Kestabilan ini mengindikasikan bahwa sistem kelistrikan pada Bus 54 berada dalam kondisi operasi *steady-state* yang sangat stabil dan tidak terpengaruh oleh gangguan, perubahan beban, atau Transien yang signifikan.

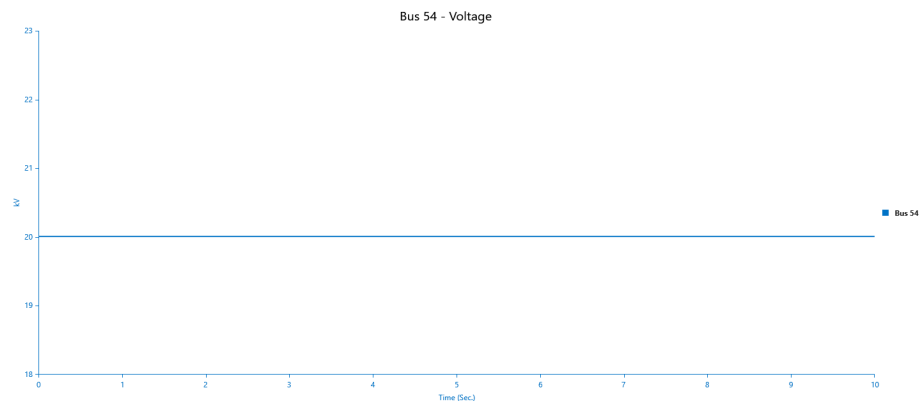
- Grafik Profil Frekuensi Bus



Gambar 8. Grafik Profil Frekuensi Bus Kondisi Siang Hari Sebelum PLTMH Golewa Masuk

Sementara itu, hasil simulasi ETAP 19.0.1 pada gambar 8 menunjukkan bahwa frekuensi pada bus penyambungan berada pada nilai 100% (50 Hz) dari detik ke-0 hingga detik ke-10. Kestabilan ini menandakan bahwa sistem tenaga listrik pada bus penyambungan beroperasi dalam kondisi *steady-state* yang sangat ideal.

- Grafik Profil Tegangan Bus

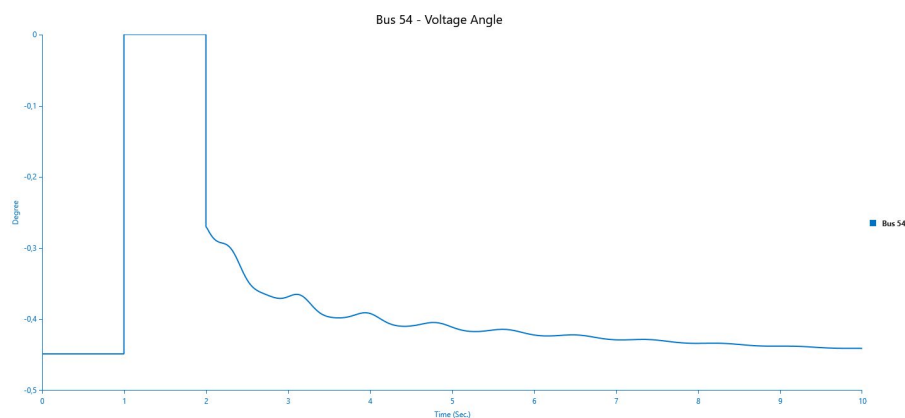


Gambar 9. Grafik Profil Tegangan Bus Kondisi Siang Hari Sebelum PLTMH Golewa Masuk

Gambar 9 memperlihatkan hasil simulasi ETAP 19.0.1, yaitu tegangan pada bus penyambungan sangat stabil dan konstan pada nilai 20 kV dari detik ke-0 hingga detik ke-10. Kestabilan ini menandakan bahwa sistem tenaga listrik pada bus penyambungan beroperasi dalam kondisi *steady-state* yang sangat ideal.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Siang Hari Sesudah PLTMH Golewa Masuk

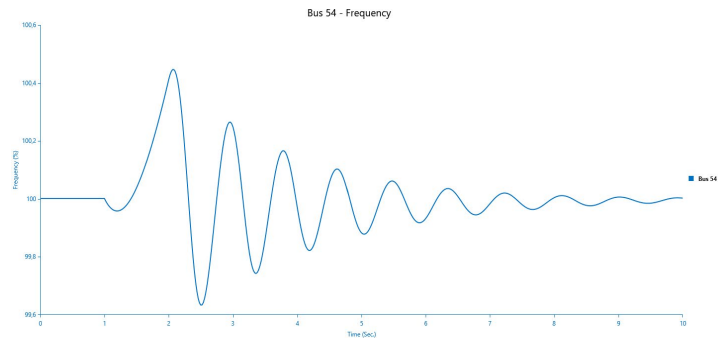
- Grafik Sudut Tegangan Bus



Gambar 10. Grafik Sudut Tegangan Bus Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Siang Hari

Hasil simulasi ETAP 19.0.1 yang ditampilkan pada Gambar 10 menunjukkan bahwa sudut tegangan pada bus penyambungan stabil pada nilai -0.45° dari detik ke-0 hingga detik ke-1. Pada detik ke-1, terjadi gangguan yang menyebabkan sudut tegangan melonjak hingga 0° dan stabil pada nilai tersebut hingga detik ke-1,8. Selanjutnya, sudut tegangan kembali mengalami penurunan ke nilai -0.27° , kemudian mengalami osilasi yang menunjukkan upaya sistem untuk meredam perubahan dan memulihkan stabilitasnya. Menjelang akhir simulasi pada detik ke-10, sudut tegangan mencapai nilai (*steady-state value*) sekitar -0.43° , yang sedikit lebih tinggi dari nilai awalnya.

- Grafik Profil Frekuensi Bus



Gambar 11. Grafik Profil Frekuensi Bus Kondisi Siang Hari Sesudah PLTMH Golewa Masuk

Pada Gambar 11, hasil simulasi ETAP 19.0.1 menunjukkan bahwa frekuensi pada bus penyambungan berada pada nilai 100% (50 Hz) dari detik ke-0 hingga detik ke-1. Setelah itu, terjadi gangguan yang menyebabkan frekuensi mulai berosilasi. Frekuensi mencapai nilai puncak tertinggi (*overshoot*) sekitar 100,45% (50,225 Hz) pada detik ke-2, dan nilai terendah 99,63% (49,815 Hz) pada detik ke-2,5. Frekuensi kemudian karakteristik osilasi teredam (*damped oscillation*), di mana amplitudo fluktuasinya teredam secara bertahap seiring berjalannya waktu. Osilasi yang mereda ini menunjukkan bahwa sistem memiliki stabilitas frekuensi dinamis yang baik, sehingga berhasil mengendalikan ketidakseimbangan daya aktif pasca-gangguan. Menjelang akhir simulasi pada detik ke-10, frekuensi berhasil kembali mendekati dan stabil pada nilai 100% (50 Hz), menandakan pemulihan penuh kondisi *steady-state* frekuensi.

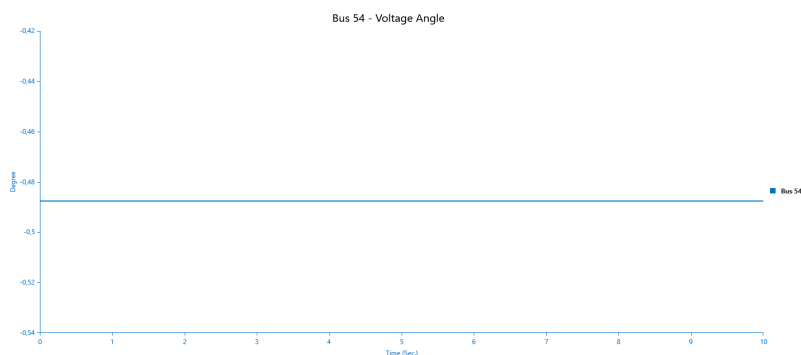
Selain sudut tegangan dan frekuensi, profil tegangan pada bus penyambungan turut diamati pada kondisi siang hari sesudah PLTMH Waeroa terhubung. Tegangan bus tetap berada pada kisaran 20 kV sepanjang periode simulasi dan tidak mengalami penurunan signifikan akibat gangguan hubung singkat 3 fasa yang terjadi pada detik ke-1, sejalan dengan pola yang teramati pada kondisi malam hari sesudah PLTMH terhubung (lihat Gambar 17). Hal ini menunjukkan bahwa profil tegangan bus tetap berada dalam kondisi *steady-state* yang baik meskipun sistem sempat mengalami gangguan sesaat.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Malam Hari

Grafik simulasi kestabilan transien di titik penyambungan Penyulang Golewa pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV pada malam hari dibagi menjadi dua, yaitu sebelum PLTMH masuk dalam sistem distribusi Bajawa dan sesudah PLTMH masuk dalam sistem distribusi Bajawa.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Malam Hari Sebelum PLTMH Golewa Masuk

- Grafik Sudut Tegangan Bus

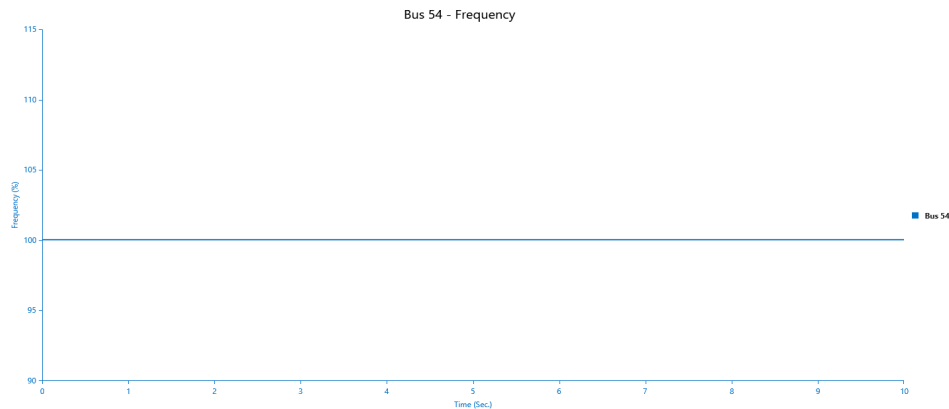


Gambar 12. Grafik Sudut Tegangan Bus Sebelum PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12, hasil simulasi ETAP 19.0.1 memperlihatkan bahwa sudut tegangan pada bus penyambungan pada detik ke-0 hingga detik ke-10 berada pada nilai sekitar $-0,49^\circ$. Sepanjang keseluruhan periode pengamatan dari detik ke-0 hingga detik ke-10, tidak terjadi perubahan

pada sudut tegangan. Kestabilan ini mengindikasikan bahwa sistem kelistrikan pada Bus 54 berada dalam kondisi operasi *steady-state* yang sangat stabil dan tidak terpengaruh oleh gangguan, perubahan beban, atau Transien yang signifikan.

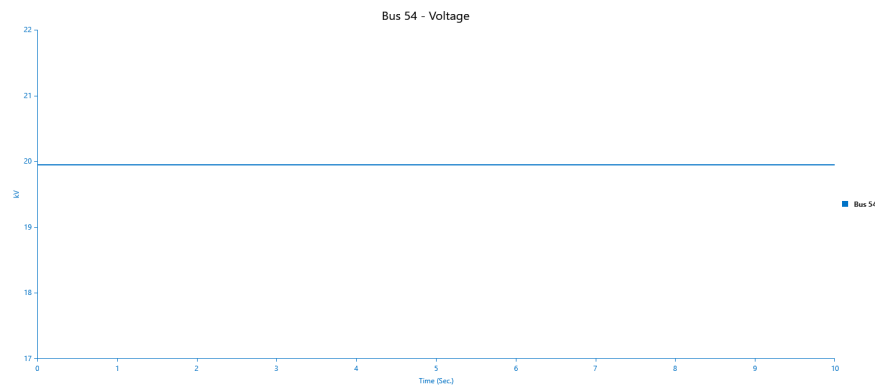
- Grafik Profil Frekuensi Bus



Gambar 13. Grafik Profil Frekuensi Bus Sebelum PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Gambar 13 menampilkan hasil simulasi ETAP 19.0.1 yang menunjukkan bahwa frekuensi pada bus penyambungan berada pada nilai 100% (50 Hz) dari detik ke-0 hingga detik ke-10. Kestabilan ini menandakan bahwa sistem tenaga listrik pada bus penyambungan beroperasi dalam kondisi *steady-state* yang sangat ideal.

- Grafik Profil Tegangan Bus

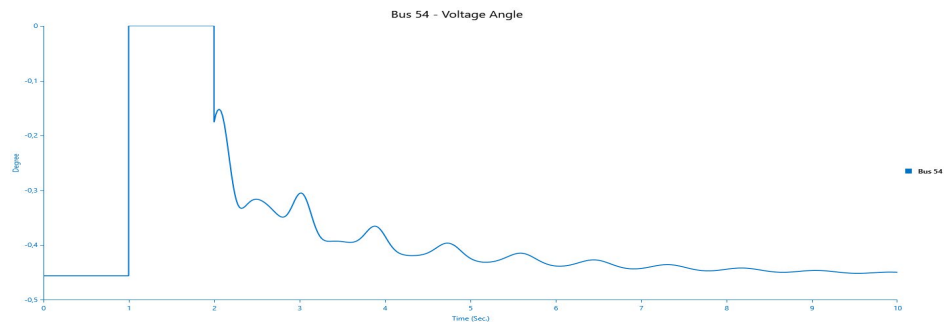


Gambar 14. Grafik Profil Tegangan Bus Sebelum PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Hasil simulasi ETAP 19.0.1 pada gambar 14 menunjukkan bahwa tegangan pada bus penyambungan sangat stabil dan konstan pada nilai 20 kV dari detik ke-0 hingga detik ke-10. Kestabilan ini menandakan bahwa sistem tenaga listrik pada bus penyambungan beroperasi dalam kondisi *steady-state* yang sangat ideal.

Grafik Kestabilan Transien pada Penyulang Golewa Kondisi Malam Hari Sesudah PLTMH Golewa Masuk

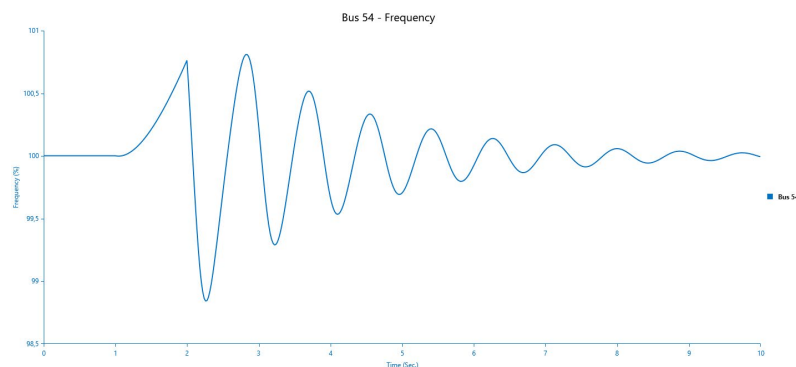
- Grafik Sudut Tegangan Bus



Gambar 15. Grafik Sudut Tegangan Bus Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Gambar 15 menunjukkan hasil simulasi ETAP 19.0.1, yaitu sudut tegangan pada bus penyambungan stabil pada nilai -0.45° dari detik ke-0 hingga detik ke-1. Pada detik ke-1, terjadi gangguan yang menyebabkan sudut tegangan melonjak hingga ke nilai 0° dan stabil pada nilai tersebut hingga detik ke-2. Selanjutnya, sudut tegangan mengalami penurunan ke nilai -0.15° , kemudian mengalami osilasi yang menunjukkan upaya sistem untuk meredam perubahan dan memulihkan stabilitasnya. Menjelang akhir simulasi pada detik ke-10, sudut tegangan mencapai nilai (*steady-state value*) sekitar -0.44° , yang sedikit lebih tinggi dari nilai awalnya.

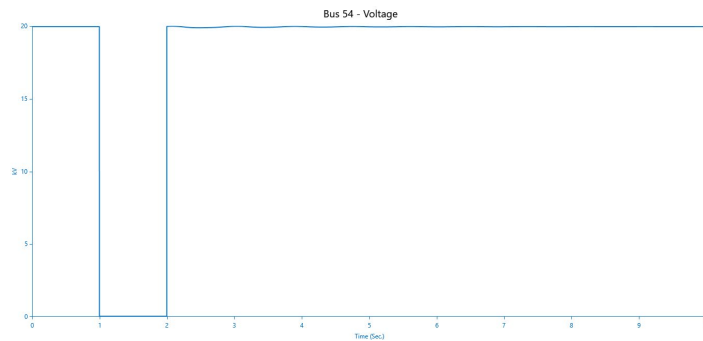
- Profil Frekuensi Bus



Gambar 16. Grafik Profil Frekuensi Bus Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Pada gambar 16, hasil simulasi ETAP 19.0.1 memperlihatkan bahwa frekuensi pada bus penyambungan berada pada nilai 100% (50 Hz) dari detik ke-0 hingga detik ke-1. Setelah itu, terjadi gangguan yang menyebabkan frekuensi mulai berosilasi. Frekuensi mencapai nilai puncak tertinggi (*overshoot*) sekitar 100.45% (50.225 Hz) pada detik ke-2, dan nilai terendah 99.63% (49.815 Hz) pada detik ke-2.5. Frekuensi kemudian karakteristik osilasi teredam (*damped oscillation*), di mana amplitudo fluktuasinya teredam secara bertahap seiring berjalannya waktu. Osilasi yang mereda ini menunjukkan bahwa sistem memiliki stabilitas frekuensi dinamis yang baik, yang berhasil mengendalikan ketidakseimbangan daya aktif pasca-gangguan. Menjelang akhir simulasi pada detik ke-10, frekuensi berhasil kembali mendekati dan stabil pada nilai 100% (50 Hz), menandakan pemulihan penuh kondisi *steady-state* frekuensi.

- Grafik Profil Tegangan Bus



Gambar 17. Grafik Profil Tegangan Bus Sesudah PLTMH Masuk pada Kondisi Malam Hari

Hasil simulasi ETAP 19.0.1 pada gambar 17 menunjukkan bahwa tegangan pada bus penyambungan pada detik ke-0 hingga detik ke-1 stabil berada pada nilai 20 kV. Pada detik ke-1, terjadi gangguan yang menyebabkan tegangan pada bus mengalami penurunan hingga 0 kV dan stabil hingga detik ke-2. Gangguan tersebut kemudian kembali kepada nilai 20 kV dan stabil pada nilai tersebut hingga detik ke-10. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem berhasil menstabilkan tegangan pasca-gangguan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penyambungan PLTMH Waeroa ke SUTM 20 kV Penyulang Golewa mempengaruhi dalam 2 kondisi dilihat dari profil tegangan. Pada saat sebelum dan sesudah masuknya PLTMH Waeroa ke jaringan SUTM 20 kV Penyulang Golewa menunjukkan kondisi sistem yang stabil baik siang maupun malam hari. Sebelum PLTMH terhubung, tegangan pada bus penyambungan berada dalam kondisi *steady-state* dengan nilai konstan 20 kV tanpa adanya gangguan. Setelah PLTMH terhubung, terjadi gangguan sesaat pada detik ke-1 yang menyebabkan penurunan tegangan hingga 0 kV, namun sistem mampu memulihkan dan menstabilkan kembali tegangan ke nilai normal 20 kV dalam waktu singkat (pada detik ke-2). Untuk itu, berdasarkan standar SPLN 1:1995 tentang Tegangan-Tegangan Standar [10], penurunan tegangan masih berada dalam batas toleransi +5% dan -10% terhadap tegangan nominal.
2. Penyambungan PLTMH Waeroa ke SUTM 20 kV Penyulang Golewa mempengaruhi dalam 2 kondisi dilihat dari profil frekuensi, menunjukkan pada saat kondisi siang dan malam hari, sebelum maupun sesudah masuknya PLTMH Waeroa ke SUTM 20 kV Penyulang Golewa menunjukkan kestabilan sistem yang baik. Sebelum PLTMH terhubung, frekuensi sistem berada dalam kondisi *steady-state* yang stabil pada 50 Hz tanpa mengalami fluktuasi. Setelah PLTMH terhubung, terjadi gangguan sesaat yang menyebabkan timbulnya osilasi frekuensi dengan nilai puncak tertinggi 50,225 Hz dan nilai terendah 49,815 Hz. Namun, osilasi tersebut bersifat teredam (*damped oscillation*) dan frekuensi sistem berhasil kembali stabil pada nilai nominal 50 Hz menjelang akhir simulasi. Nilai frekuensi tersebut sesuai dengan nominal yang ditentukan dalam Peraturan Menteri ESDM No. 20 Tahun 2020 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code) [11].
3. Penyambungan PLTMH Waeroa ke SUTM 20 kV Penyulang Golewa juga memengaruhi profil sudut tegangan bus pada titik interkoneksi. Sebelum PLTMH terhubung, baik pada siang maupun malam hari, sudut tegangan bus stabil pada nilai sekitar $-0,49^\circ$ sepanjang simulasi tanpa mengalami perubahan berarti. Setelah PLTMH terhubung, sudut tegangan bus pada kondisi awal stabil di $-0,45^\circ$, kemudian melonjak ke 0° saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada detik ke-1, sebelum akhirnya menurun kembali dan berosilasi teredam. Pada siang hari, sudut tegangan bus turun ke $-0,27^\circ$ sebelum stabil di sekitar $-0,43^\circ$ pada akhir simulasi, sedangkan pada malam hari sudut tegangan bus turun ke $-0,15^\circ$ sebelum stabil di sekitar $-0,44^\circ$. Perbedaan nilai transien antara kondisi siang dan malam ini mengindikasikan sedikit perbedaan karakteristik pembebanan sistem pada kedua waktu tersebut, namun keduanya tetap kembali stabil pada akhir simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. K. P. Paramadita, N. P. Satriya Utama, and I. W. Arta Wijaya, "Analisis Gangguan Hubung Singkat Simetris Dan Asimetris Untuk Menentukan Kapasitas Pengaman Yang Terpasang Pada Jaringan Distribusi 20 Kv Penyulang Mambal," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, p. 74, 2019, doi: 10.24843/spektrum.2019.v06.i03.p10.
- [2] M. S. Anam, I. Sunaryantiningih, and I. T. Yuniahastuti, "Analisa Potensi Sumber Daya Air Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh)," *ELECTRA : Electrical Engineering Articles*, vol. 3, no. 01, p. 08, 2022, doi: 10.25273/electra.v3i01.13485.
- [3] PT PLN (Persero) No. 0520-1.K/DIR/2014, *Buku Pedoman Pemeliharaan Serandang Gardu Induk*, vol. 2. 2014.
- [4] Marhatang, M. Saini, M. I. Fauzan, and Erniwati, "Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Pada Jaringan Listrik Wilayah Sulselbar Setelah Penambahan PLTU Punagaya," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 18, no. 1, 2020, doi: 10.31963/sinergi.v18i1.2247.
- [5] P. Andi Dinata, I. W. Arta Wijaya, and I. M. Suartika, "Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Daya Output Pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Dengan Menggunakan Turbin Crossflow," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 7, no. 3, p. 34, 2020, doi: 10.24843/spektrum.2020.v07.i03.p5.
- [6] Aswin Dwi Rochman, Gatut Budiono, and Reza Sarwo Widagdo, "Analisa Kestabilan Transien Pada Jaringan Listrik 150KV Di Gardu Induk Waru," *Jurnal Elektronika dan Teknik Informatika Terapan (JENTIK)*, vol. 1, no. 3, pp. 54–64, 2023, doi: 10.59061/jentik.v1i3.353.
- [7] A. D. Novfowan, M. Mieftah, and W. Kusuma, "Analisis Stabilitas Transien Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 8, no. 1, pp. 28–33, 2023, doi: 10.33795/elposys.v8i1.31.
- [8] P. Prasetyo, D. Despa, H. Gusmedi, and L. Hakim, "Analisis Perubahan Reaktansi Saluran Terhadap Transient Stability Of Multimachine Dengan Metode Runge-Kutta Fehlberg," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 4, no. 2, 2016, doi: 10.23960/jitet.v4i2.540.
- [9] N. D. Pratiwi and Isdiyato, "Analisis Ketidakstabilan Tegangan dan Frekuensi pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Soko Kembang," *Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah*, vol. 11, no. 2, 2019, doi: 10.33322/energi.v11i2.864.
- [10] PT PLN (Persero), "SPLN 1:1995, Tegangan-Tegangan Standar," Jakarta: PT PLN (Persero), 1995.
- [11] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2020 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code), 2020.