

Analisa Pengaruh Parameter KA dan TA Sistem Eksitasi Terhadap Stabilitas Transien Generator 7 MW

¹ Mochamad Indra Ramadhan,² Abraham Lomi,³ Irrine Budi Sulistiawati

Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang

¹indraramadhann29@gmail.com, ²abraham@lecturer.itn.ac.id, ³irrine@lecturer.itn.ac.id

Abstract—Transient stability refers to the ability of an electric power system to maintain generator synchronism following a disturbance. This study aims to analyze the effect of varying the K_a and T_a parameters of the IEEE ST2A excitation system on the transient stability of the 7 MW generator at the Ropa Steam Power Plant (PLTU) during a three-phase short-circuit fault. The electrical system of Ende Regency was modeled using the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), with fault clearing times varied at 0.10, 0.30, 0.50, 0.55, 0.60, and 0.70 seconds. The analysis involved comparing the initial excitation parameter settings with conditions where K_a and T_a were increased by 50%. Simulation results indicate that the system remained stable up to a clearing time of 0.55 seconds, whereas at 0.60 seconds, the system became unstable, as evidenced by angle wrapping and pole slipping. Consequently, the Critical Clearing Time (CCT) falls within the range of $0.55 < CCT < 0.60$ seconds. Increasing K_a and T_a by 50% did not alter the CCT limit but did influence the response and oscillation amplitude of the rotor angle. These results demonstrate that the fault clearing time has a dominant effect on the generator's transient stability limit.

Keywords—transient stability, excitation system, K_a , T_a , ST2A, rotor angle, Critical Clearing Time, 7 MW generator.

Abstrak—Stabilitas transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik dalam mempertahankan sinkronisme generator setelah terjadi gangguan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perubahan parameter K_a dan T_a sistem eksitasi ST2A terhadap stabilitas transien generator 7 MW PLTU Ropa saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Sistem kelistrikan Kabupaten Ende dimodelkan menggunakan Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) dengan variasi clearing time 0,10; 0,30; 0,50; 0,55; 0,60; dan 0,70 s. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi parameter eksitasi awal dengan kondisi K_a dan T_a yang dinaikkan sebesar 50%. Hasil simulasi menunjukkan sistem masih stabil hingga clearing time 0,55 s, sedangkan pada 0,60 s sistem mengalami ketidakstabilan yang ditunjukkan oleh angle wrapping dan pole slipping. Dengan demikian, CCT berada pada interval $0,55 < CCT < 0,60$ s. Peningkatan K_a dan T_a sebesar 50% tidak mengubah batas CCT, tetapi memengaruhi respons dan amplitudo osilasi sudut rotor. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu pemutusan gangguan memiliki pengaruh dominan terhadap batas stabilitas transien generator.

Kata Kunci—stabilitas transien, sistem eksitasi, K_a , T_a , ST2A, sudut rotor, *Critical Clearing Time*, generator 7 MW.

I. PENDAHULUAN

Dalam Sistem kelistrikan Kabupaten Ende di wilayah Nusa Tenggara Timur memiliki struktur jaringan terisolasi berkarakteristik radial yang rentan terhadap gangguan operasional maupun faktor lingkungan [1]. Dalam sistem ini PLTU Ropa (2×7 MW) berperan sebagai pembangkit *base-load* yang menyuplai daya secara berkesinambungan. Unit termal ini dapat dioperasikan pada beban parsial selama berada di atas *minimum stable generation* dan memenuhi batas teknis operasionalnya. Selain menyuplai energi harian, unit pembangkit dituntut tetap mampu mempertahankan keserempakan dan kembali ke kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan besar seperti hubung singkat tiga fasa, pelepasan saluran transmisi, maupun fluktuasi beban mendadak yang dikenal sebagai stabilitas transien [2]. Kegagalan dalam menjaga stabilitas transien berpotensi memicu osilasi sudut rotor yang tak teredam, kehilangan sinkronisasi antargenerator, pemisahan sistem, hingga pemadaman total (*blackout*).

Salah satu penyebab terjadinya stabilitas transient pada sistem karena gangguan hubung singkat 3 fasa pada sistem. Keadaan ini direspon oleh generator dengan bekerjanya eksitasi mengontrol tegangan medan rotor, tegangan terminal, serta pasokan daya reaktif [3]. Parameter utama sistem eksitasi meliputi *amplifier gain* (K_A), konstanta waktu (T_A , T_E), batas tegangan (V_{Rmax} , V_{Rmin}), serta parameter sensor tegangan [4]. Dalam praktik operasional, K_A sering disetel karena berpengaruh langsung terhadap sensitivitas *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Penyetelan parameter yang

kurang tepat dapat memperlambat pemulihan tegangan atau memicu osilasi berlebihan; variasi hingga 25% umumnya aman untuk simulasi, sedangkan perubahan di atas 50% berpotensi menurunkan margin kestabilan [5]. Optimasi parameter AVR terbukti dapat meningkatkan faktor redaman osilasi dan memperluas margin stabilitas transien pada sistem *multi-machine*.

Kajian literatur menunjukkan bahwa pemilihan model eksitasi memberikan dampak signifikan terhadap performa kestabilan. Al-Zahrani dan Ramdas [6] menegaskan bahwa sistem eksitasi statis berbasis penyearah thyristor tipe eksitasi ST2A memiliki respons dinamis yang lebih unggul dibandingkan tipe konvensional seperti eksitasi DC1A (eksitasi DC) dan AC4A (eksitasi *brushless*). Hal ini disebabkan oleh ketiadaan penundaan inersia mekanis pada ST2A, sehingga memfasilitasi modulasi tegangan medan secara cepat untuk meredam osilasi sudut rotor dan memperpanjang *Critical Clearing Time* (CCT) pascagangguan. Selain itu, ST2A dilengkapi fitur proteksi seperti *Voltage Dependent Limiter* (VDL) dan *Minimum Excitation Limiter* (MEL) [7]. Pada pembangkit berkapasitas menengah yang terhubung pada jaringan radial seperti di wilayah Nusa Tenggara Timur, margin kestabilan cenderung lebih kecil dan sangat sensitif terhadap perubahan parameter pengendali.

Berdasarkan penelitian terdahulu, analisis stabilitas transien telah banyak dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh sistem eksitasi dan waktu pemutusan gangguan. Namun, analisis yang secara khusus membandingkan perubahan parameter K_a dan T_a sebesar 50% terhadap respons sudut rotor dan batas *Critical Clearing Time* (CCT) pada generator 7 MW PLTU Ropa masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perubahan K_a dan T_a sistem eksitasi ST2A terhadap stabilitas transien generator saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Kontribusi penelitian ini adalah mengevaluasi perubahan respons sudut rotor serta batas CCT akibat peningkatan K_a dan T_a sebesar 50%, sehingga dapat diketahui apakah perubahan parameter eksitasi tersebut memengaruhi batas kestabilan transien generator.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode

Tahap desain sistem dilakukan dengan memodelkan sistem kelistrikan Kabupaten Ende berdasarkan data yang telah diperoleh, mencakup komponen generator, transformator, beban, sistem eksitasi, dan AVR. Setelah pemodelan selesai, simulasi gangguan dijalankan untuk mengamati respons dinamis sistem terhadap kondisi transien. Tahap akhir penelitian adalah analisis hasil simulasi stabilitas transien pada generator sinkron PLTU Ropa, dengan mengevaluasi beberapa indikator utama yang meliputi respons sudut rotor, kecepatan putar (rpm) generator, keluaran daya generator, serta frekuensi dan tegangan bus.

Pada bagian ini dijelaskan hasil simulasi dan analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan Kabupaten Ende yang terhubung dengan unit pembangkit PLTU Ropa 2×7 MW. Pengujian dilakukan dengan memberikan gangguan berat berupa hubung singkat tiga fasa pada bus GI Ropa, variasi durasi pemutusan gangguan (*clearing time*), variasi kenaikan beban, serta pengujian sensitivitas parameter sistem eksitasi IEEE ST2A. Persamaan ayunan (*swing equation*) yang mendasari dinamika sudut rotor generator dinyatakan sebagai berikut:

$$\left(\frac{2H}{\omega_s}\right) \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

Dimana H merupakan konstanta inersia generator, ω_s adalah kecepatan sudut sinkron, δ adalah sudut rotor, P_m adalah daya mekanik masukan, dan P_e adalah daya listrik keluaran. Daya listrik keluaran generator pada sistem dinyatakan melalui Persamaan (2):

$$P_e = \frac{E \cdot V}{X} \sin \delta \quad (2)$$

Persamaan daya-sudut (*power-angle equation*) yang merepresentasikan besarnya transfer daya listrik aktif (P_e) dari generator sinkron menuju sistem kelistrikan. Magnitudo daya listrik keluaran ini berbanding lurus dengan Gaya Gerak Listrik (GGL) internal generator (E), tegangan terminal bus (V), serta fungsi sinus sudut relatif rotor (δ), dan berbanding terbalik terhadap reaktansi ekivalen total sistem (X).

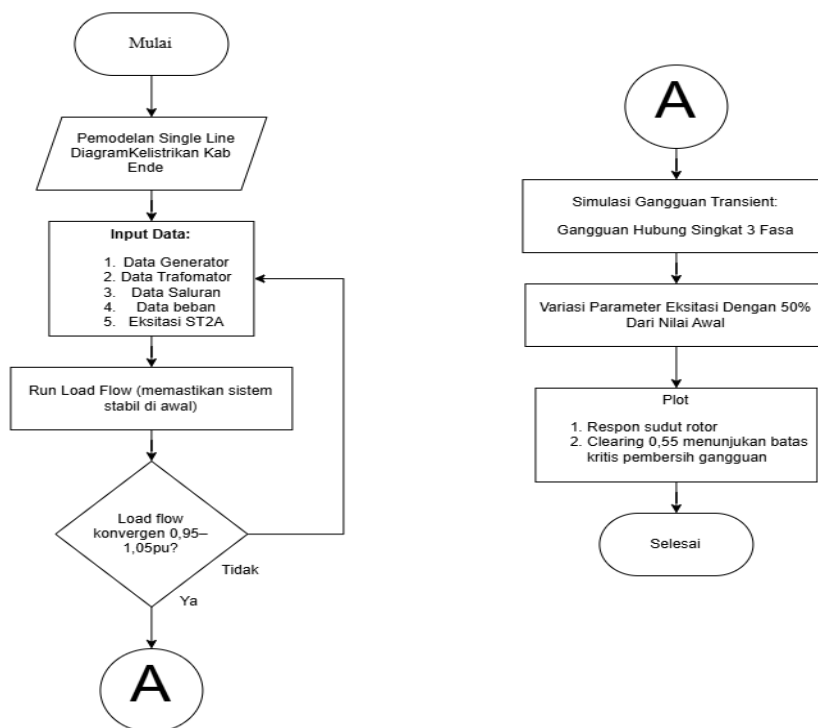
$$CCT = t_{cc} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cc}-\delta_0)}{\omega_s \cdot P_m}} \quad (3)$$

Dimana formulasi analitis untuk menghitung nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada kondisi gangguan hubung singkat tiga fasa penuh ($P_e = 0$). Nilai CCT berbanding lurus dengan akar dari konstanta inersia generator (H) serta selisih antara sudut kritis pembersihan gangguan (δ_{cc}) dan sudut rotor kondisi awal (δ_0). Sebaliknya, CCT berbanding terbalik dengan kecepatan sudut sinkron (ω_s) dan daya mekanik masukan dari turbin (P_m).

Secara fisis, persamaan ini menunjukkan bahwa generator dengan inersia rotor yang lebih besar (H) atau dengan pembebanan awal yang lebih rendah (P_m) membutuhkan durasi waktu akumulasi energi percepatan yang lebih lama untuk mencapai sudut kritis (δ_{cc}), sehingga menghasilkan margin waktu pemutusan gangguan (CCT) yang lebih panjang sebelum sistem mengalami kehilangan sinkronisme (*pole slipping*).

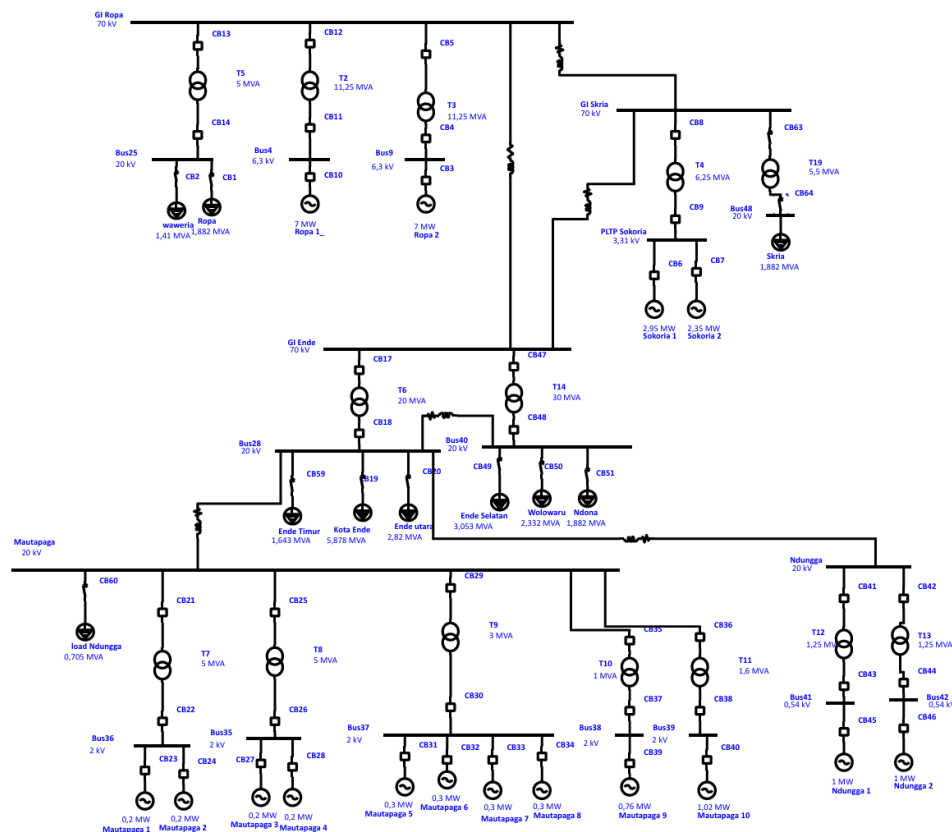
B. Flowchart Simulasi

Untuk mempermudah memahami tahapan pada simulasi, maka akan disajikan tahapan simulasi dalam bentuk flowchart seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Flowchart Simulasi

C. Single Line Diagram Kabupaten Ende



Gambar 2 Single Line Diagram Kelistrikan Kabupaten Ende

Single Line Diagram (SLD) pada Gambar 2 merepresentasikan topologi interkoneksi sistem kelistrikan Kabupaten Ende yang mencakup jaringan transmisi 70 kV dan jaringan distribusi 20 kV. Tulang punggung transmisi 70 kV menghubungkan tiga gardu induk utama, yaitu GI Ropa, GI Ende, dan GI Skria. Pasokan daya utama bersumber dari PLTU Ropa (2×7 MW) pada tegangan 6,3 kV yang dinaikkan ke 70 kV melalui transformator *step-up* T2 dan T3 (masing-masing 11,25 MVA), disokong oleh PLTP Sokoria (5,3 MW) di GI Skria, serta pembangkit lokal seperti PLTD Mautapaga dan PLTMH Ndungga. Penyaluran daya dari saluran transmisi 70 kV ke jaringan distribusi 20 kV ditransformasikan oleh trafo T6 (20 MVA) dan T14 (30 MVA) di GI Ende untuk melayani pusat-pusat beban wilayah, meliputi Kota Ende (5,878 MVA), Ende Selatan, Ende Utara, Wolowaru, Ndona, Ende Timur, Waweria, Skria, dan Ndungga. Seluruh busbar, penyulang, dan unit pembangkit dilengkapi pemutus tenaga (*Circuit Breaker*) untuk koordinasi proteksi. Pemodelan topologi SLD ini menjadi dasar analisis *load flow* dan stabilitas transien akibat gangguan hubung singkat tiga fasa.

1. Data Eksitasi ST2A

Tabel 1 Data Parameter Eksitasi ST2A

DATA PARAMETER EKSITASI IEEE ST2A	
(T_R)	0,1000 s
(V_{IMAX})	0,200
(V_{IMIN})	-0,200
(T_C)	0,0100 s
(T_R)	10,00 s
(T_{C1})	0,010 s
(T_{R1})	0,100 s
(K_A)	51,00
(T_A)	0,0100 s

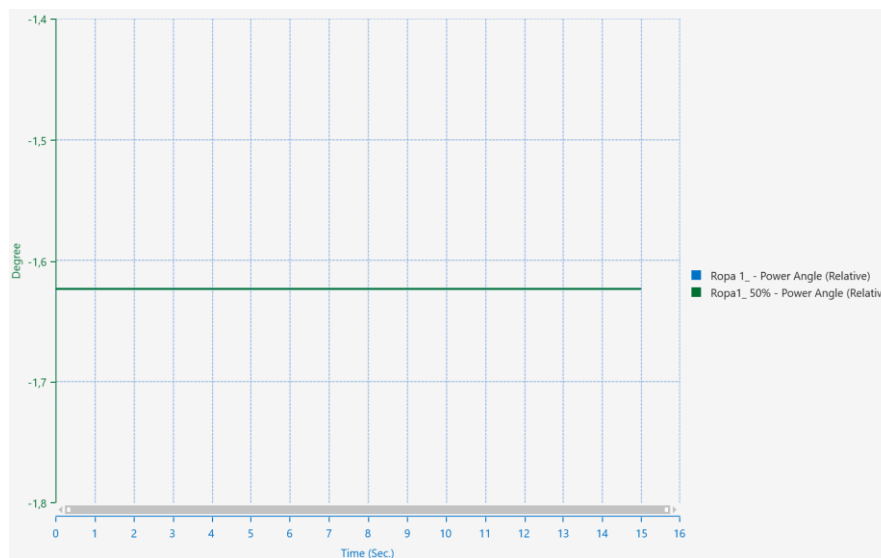
DATA PARAMETER EKSITASI IEEE ST2A	
(V_{AMAX})	4,600
(V_{AMIN})	-4,600
(V_{RMAX})	3,400
(V_{RMIN})	-3,400
(K_C)	0,0100
(K_F)	0,100
(T_F)	0,3100 s
(K_{LR})	1,000

Tabel 1. Data parameter model sistem eksitasi statis ST2A yang diimplementasikan pada generator sinkron ditunjukkan pada Tabel. Parameter utama pengatur tegangan mencakup *gain* regulator tegangan $K_A = 51,00$ dengan konstanta waktu $T_A = 0,0100$ s, konstanta waktu transduser tegangan $T_R = 0,1000$ s, serta batas keluaran regulator $V_{RMAX}/V_{RMIN} = 3,400/-3,400$. Rangkaian umpan balik stabilisasi dilengkapi dengan *gain* $K_F = 0,100$ dan konstanta waktu filter $T_F = 0,3100$ s, sedangkan faktor komutasi penyearah diwakili oleh $K_C = 0,0100$. Seluruh parameter ini diinputkan ke dalam perangkat lunak ETAP untuk merepresentasikan karakteristik respons dinamis *Automatic Voltage Regulator* (AVR) saat simulasi stabilitas transien, serta menjadi nilai acuan (*base case*) sebelum dilakukan variasi pengujian peningkatan parameter sebesar 50%.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

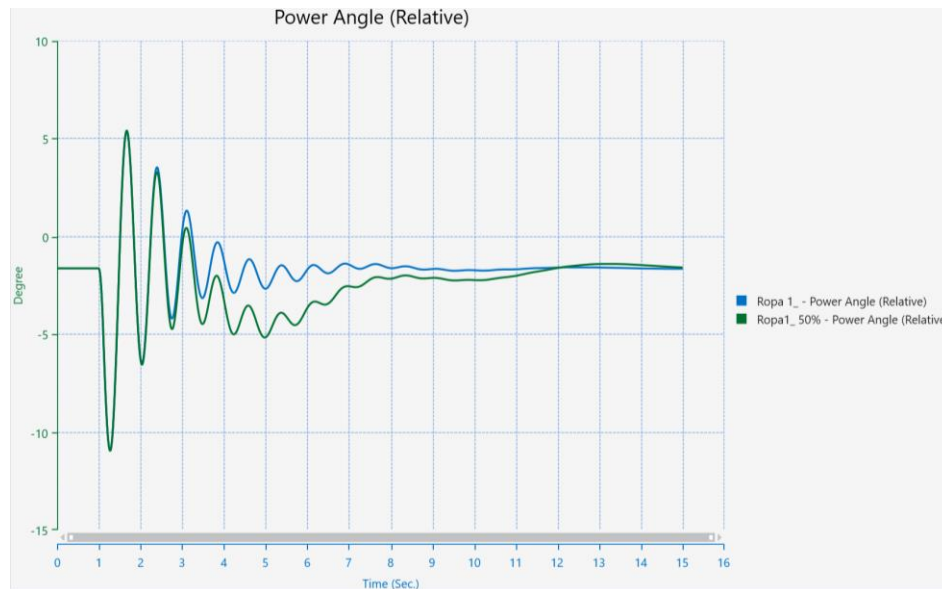
Gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus GI Ropa merupakan jenis gangguan paling berat karena menyebabkan penurunan tegangan secara drastis, sehingga daya listrik keluaran (P_e) turun mendekati nol secara mendadak. Akibatnya, terjadi ketidakseimbangan daya ($P_m > P_e$) yang memicu timbulnya energi percepatan pada rotor generator. Sebelum gangguan diterapkan, sistem diuji pada kondisi operasi awal (*base case*) untuk memastikan seluruh generator beroperasi dalam keadaan seimbang. Respons sudut rotor pada kondisi *base case* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Respon Sudut Rotor Kondisi Base Case

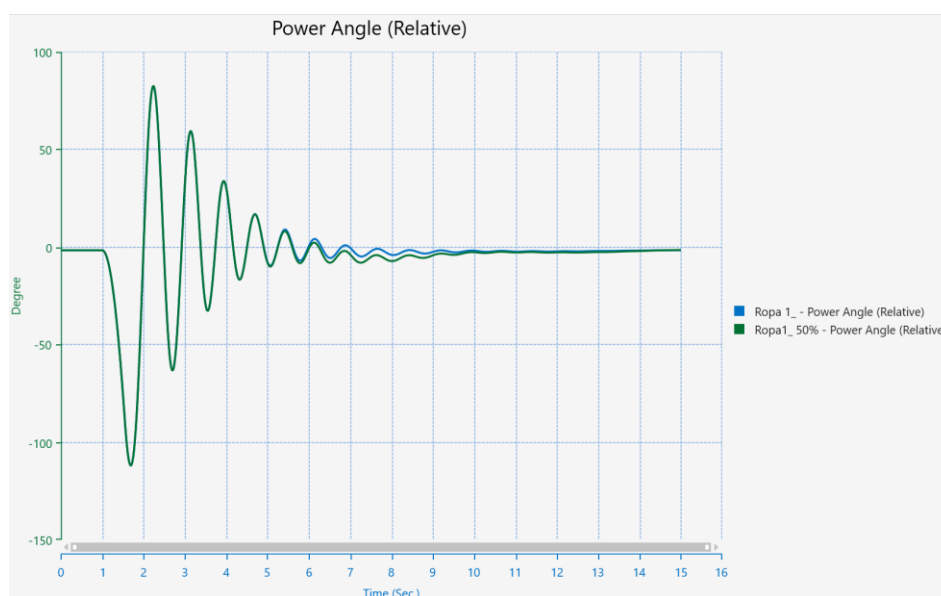
Gambar 3 merepresentasikan profil respons sudut rotor relatif (δ) generator PLTU Ropa pada kondisi operasi normal (*base case*) tanpa adanya gangguan selama durasi simulasi 15 detik. Kurva menunjukkan garis lurus konstan yang berhimpit pada nilai $-1,62^\circ$. Kondisi linier ini mengindikasikan bahwa sistem berada dalam keadaan *steady-state* yang seimbang, di mana seluruh unit generator terinterkoneksi secara sinkron dengan frekuensi dan sudut fase yang stabil.

Selanjutnya, simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada bus GI Ropa dengan variasi *clearing time* 0,1 s; 0,3 s; 0,5 s; 0,55 s; 0,60 s; dan 0,70 s. Plot grafik respons dinamis sudut rotor ditampilkan pada tiga kondisi representatif, yaitu kondisi pemulihan cepat (0,1 s), kondisi batas kritis stabil (0,55 s), dan kondisi tidak stabil/*pole slipping* (0,60 s), yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6.



Gambar 4 Respon Sudut Rotor Kondisi Clearing 0,1s

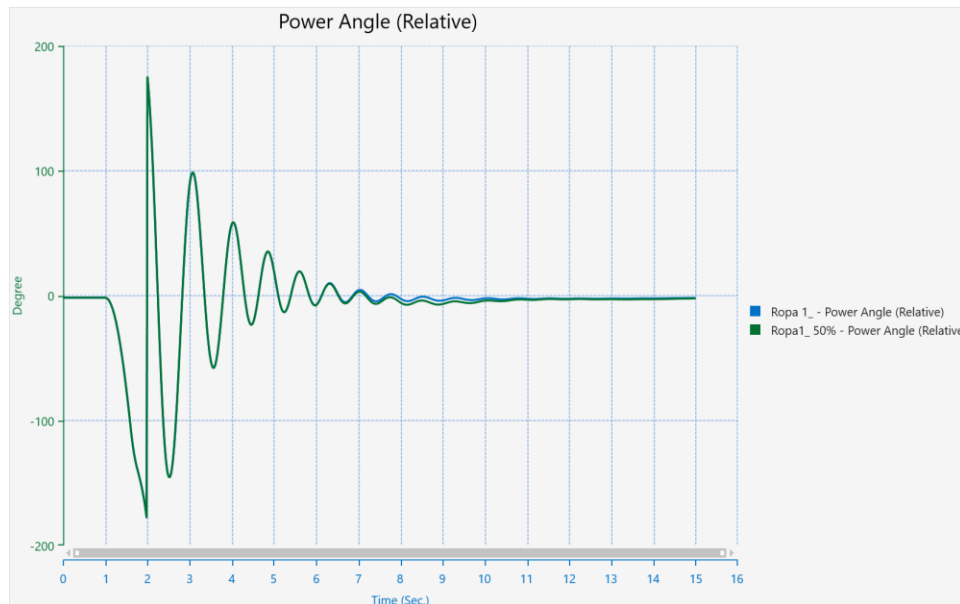
Gambar 4 menampilkan karakteristik ayunan sudut rotor relatif generator saat gangguan diputus pada *clearing time* 0,1 detik. Akibat durasi gangguan yang sangat singkat, akumulasi energi percepatan pada rotor relatif kecil sehingga simpangan sudut awal hanya mencapai -11° hingga $5,5^\circ$. Osilasi transien teredam dengan cepat dan kembali menuju titik keseimbangan tunak dalam waktu singkat, yang menandakan sistem berada dalam kondisi sangat stabil. Sebagai pembandingan, kondisi clearing time 0,10 s menunjukkan respons sudut rotor dengan amplitudo paling kecil dibandingkan kondisi clearing time yang lebih lama. Hal ini menunjukkan bahwa semakin cepat gangguan diputus, semakin kecil energi percepatan yang terakumulasi pada rotor sehingga penyimpangan sudut rotor dapat ditekan dan sistem lebih cepat kembali menuju kondisi keseimbangan.



Gambar 5 Respon Sudut Rotor Kondisi Clearing 0,55s

Gambar 5 memperlihatkan respons dinamis sudut rotor ketika waktu pemutusan gangguan diperpanjang hingga 0,55s. Penundaan isolasi gangguan menyebabkan selisih daya mekanik dan listrik terakumulasi lebih besar,

sehingga memicu ayunan sudut rotor yang signifikan hingga mencapai kisaran -110° dan 80° . Meskipun demikian, gelombang osilasi tetap menunjukkan pola teredam (*damped oscillation*) dan kembali mendekati keadaan tunak pada detik ke-9 hingga ke-10, yang mengonfirmasi bahwa 0,55s merupakan batas maksimum waktu pemutusan gangguan di mana generator masih mampu mempertahankan sinkronismenya. Dibandingkan dengan kondisi clearing time 0,10 s, peningkatan clearing time menjadi 0,55 s menyebabkan amplitudo ayunan sudut rotor meningkat secara signifikan. Peningkatan amplitudo tersebut menunjukkan bahwa rotor menerima energi percepatan yang lebih besar selama gangguan berlangsung. Meskipun demikian, respons pada clearing time 0,55 s masih menunjukkan pola osilasi yang teredam sehingga generator tetap mampu mempertahankan sinkronisme. Kondisi ini menunjukkan bahwa 0,55 s merupakan kondisi yang sangat dekat dengan batas kestabilan transien sistem.



Gambar 6 Respon Sudut Rotor Kondisi Clearing 0,6s

Gambar 6 mengilustrasikan respons sudut rotor pada kondisi tidak stabil ketika *clearing time* melampaui batas kritis yaitu 0,60s. Kurva memperlihatkan pergerakan sudut yang melampaui batas representasi 180° dan mengalami diskontinuitas mendadak (*angle wrapping*). Secara fisis, kondisi ini menandakan terjadinya fenomena *pole slipping* atau kehilangan kestabilan transien, di mana torsi sinkronisasi sistem tidak lagi mampu mengerem percepatan rotor generator. Jika dibandingkan dengan kondisi clearing time 0,55 s, peningkatan waktu pemutusan gangguan hanya sebesar 0,05 s menjadi 0,60 s sudah menyebabkan perubahan kondisi sistem dari stabil kritis menjadi tidak stabil. Perubahan ini menunjukkan bahwa margin kestabilan transien pada daerah sekitar batas kritis sangat kecil. Dengan demikian, ketepatan dan kecepatan sistem proteksi dalam memutus gangguan menjadi faktor penting dalam mempertahankan sinkronisme generator.

B. Rekapitulasi Respons Sudut Rotor akibat Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Tabel 2 Rekapitulasi Respons Sudut Rotor akibat Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Clearing Time (s)	Sudut Minimum ($^\circ$)	Sudut Maksimum ($^\circ$)	Perbandingan Parameter Eksitasi	Status Kestabilan
0,10	-11°	5°	Kurva parameter awal dan 50% berhimpit	Stabil
0,30	-42°	29°	Pola osilasi teredam, perbedaan respons relatif kecil	Stabil

0,50	-94°	70°	Peningkatan gain 50% belum mengubah status kestabilan.	Stabil
0,55	-110°	80°	Amplitudo osilasi besar namun teredam (batas kritis).	Stabil kritis
0,60	-175°	175°	Terjadi <i>angle wrapping</i> dan <i>pole slipping</i> .	Tidak stabil
0,70	-180°	180°	Terjadi kehilangan sinkronisme permanen	Tidak stabil

Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan clearing time secara konsisten memperbesar amplitudo ayunan sudut rotor. Pada clearing time 0,10 s sistem masih stabil dengan osilasi kecil, sedangkan pada 0,30 s hingga 0,55 s amplitudo meningkat namun sistem tetap sinkron. Sebaliknya, pada 0,60 s dan 0,70 s terjadi angle wrapping dan pole slipping yang menandakan ketidakstabilan transien.

Perbandingan parameter eksitasi menunjukkan bahwa peningkatan K_a dan T_a sebesar 50% tidak mengubah batas kestabilan sistem, di mana kondisi stabil tetap terjadi hingga 0,55 s dan ketidakstabilan pada 0,60 s. Namun, perubahan tersebut memengaruhi karakteristik osilasi sudut rotor tanpa menggeser nilai batas kestabilan.

Secara keseluruhan, clearing time merupakan faktor dominan yang menentukan kestabilan transien, sedangkan K_a dan T_a lebih berpengaruh terhadap respons dinamis sistem. Dengan demikian, CCT pada sistem ini terutama ditentukan oleh durasi gangguan sebelum pemutusan.

C. Penentuan Critical Clearing Time (CCT)

Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) merupakan parameter batas waktu maksimum bagi sistem proteksi untuk memutus gangguan agar generator tidak kehilangan sinkronisme. Evaluasi penentuan nilai CCT berdasarkan batas kondisi stabil dan tidak stabil disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Penentuan Nilai Critical Clearing Time (CCT)

Kondisi parameter eksitasi	Clearing time terbesar yang masih stabil	Clearing time terkecil yang tidak stabil	Interval CCT	Batas CCT Stabil
Eksitasi awal	0,55 detik	0,6 detik	$0,55 < CCT < 0,6$ detik	0,55 detik
Eksitasi dinaikkan 50%	0,55 detik	0,6 detik	$0,55 < CCT < 0,6$ detik	0,55 detik

Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, peningkatan K_a dan T_a sebesar 50% tidak mengubah batas CCT karena kedua kondisi menunjukkan kestabilan hingga 0,55 s dan ketidakstabilan pada 0,60 s. Dengan demikian, pada kondisi yang diuji, clearing time lebih dominan terhadap batas kestabilan transien, sedangkan K_a dan T_a lebih memengaruhi karakteristik osilasi sudut rotor.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, gangguan hubung singkat tiga fasa menyebabkan peningkatan amplitudo osilasi sudut rotor seiring bertambahnya clearing time. Generator PLTU Ropa masih mampu mempertahankan sinkronisme hingga clearing time 0,55 s, sedangkan pada 0,60 s terjadi angle wrapping dan pole slipping yang menunjukkan ketidakstabilan transien. Dengan demikian, CCT berada pada interval $0,55 < CCT < 0,60$ s.

Peningkatan parameter K_a dan T_a sebesar 50% tidak mengubah batas kestabilan maupun interval CCT, tetapi memengaruhi karakteristik dan amplitudo osilasi sudut rotor. Pada kondisi yang diuji, clearing time memberikan pengaruh lebih dominan terhadap batas kestabilan transien dibandingkan perubahan K_a dan T_a .

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. M. T. Salleh, A. N. B. Alsammak, and H. A. Mohammed, "A Review on Enhancing Power System Transient Stability Using Static VAR Compensator-Based Intelligent Control," 2025, *Department of Agribusiness, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*. doi: 10.18196/jrc.v6i1.24626.
- [2] X. Sun, "Analysis on Sensitivity of Power System Stability to Generator Parameters," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 07, no. 01, pp. 165–182, 2019, doi: 10.4236/jpee.2019.71009.
- [3] *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) : IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. IEEE, 2016.
- [4] N. L. Thotakura, C. R. Burge, and Y. Liu, "Impact of the Exciter and Governor Parameters on Forced Oscillations," *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.3390/electronics13163177.
- [5] A. Fathollahi and B. Andresen, "Enhancing Transient Stability in Multi-Machine Power Systems through a Model-Free Fractional-Order Excitation Stabilizer," *Fractal and Fractional*, vol. 8, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/fractalfract8070419.
- [6] A. Al-Zahrani and S. K. Ramdas, "Performance Evaluation of Excitation Systems in Stability Enhancement of Power Systems," *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 7, no. 5, pp. 82–93, Oct. 2022, doi: 10.24018/ejeng.2022.7.5.2820.
- [7] G. Kumar. Venayagamoorthy, *PSC : 2014 Clemson University Power Systems Conference : March 11th-14th, 2014, Clemson University Clemson, South Carolina, USA*. IEEE, 2014.