

Analisa Penggunaan PSS Dan Eksitasi IEEE Tipe-1 Untuk Optimasi Stabilitas Sistem 500kV

¹ Mochammad Bintang Dzakwansyah, ² Abraham Lomi, ³ Irrine Budi Sulistiawati
Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang

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

Abstract - Transient stability is a critical aspect of power system operation, as disturbances such as three-phase short circuits can trigger generator rotor angle oscillations and compromise system synchronism. This study aims to analyze the impact of integrating a Power System Stabilizer (PSS) with the excitation system on transient stability enhancement and to compare the performance of the IEEE Type 1 and AC1A excitation systems in damping oscillations and improving the Critical Clearing Time (CCT). Simulations were conducted on the 500 kV Area IV interconnected power system under a three-phase short-circuit disturbance. The performance of the Base Case and Design parameters was evaluated for both excitation system models. The results show that the Design PSS effectively improves rotor angle oscillation damping, increasing the maximum power transfer (P_{max}) from 7.50 pu to 8.35 pu while also increasing the Critical Clearing Time (CCT) from 0.5174 s to 0.5282 s, an increase of 2.09%. In addition, the Design parameters provide better oscillation damping than the Base Case, allowing the system to maintain transient stability after the disturbance is cleared. Overall, the AC1A excitation system with the Design parameters demonstrates more consistent damping performance, while the IEEE Type 1 Design also improves transient stability under the simulated three-phase short-circuit condition.

Keywords- Power System Stabilizer, IEEE Type 1 Excitation System, AC1A, Transient Stability, Critical Clearing Time

Abstrak - Kestabilan merupakan aspek penting dalam operasi sistem tenaga listrik karena gangguan hubung singkat dapat memicu osilasi sudut rotor dan mengganggu sinkronisasi sistem. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh *Power System Stabilizer* (PSS) dengan sistem eksitasi terhadap peningkatan kestabilan sistem. Pengujian dilakukan melalui simulasi pada sistem interkoneksi 500 kV Area IV dengan skenario gangguan hubung singkat tiga fasa, menggunakan kondisi *Base Case* dan IEEE Tipe-1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PSS dengan parameter *Design* mampu meningkatkan redaman osilasi sudut rotor dibandingkan *Base Case*. Selain itu, daya maksimum P_{max} meningkat dari 7,50 pu menjadi 8,35 pu, sedangkan nilai CCT meningkat dari 0,5174 s menjadi 0,5282 s, atau naik sebesar 2,09%, sehingga kestabilan transien sistem tetap terjaga. Secara keseluruhan, sistem eksitasi AC1A dengan parameter *Design* memberikan performa redaman osilasi yang lebih baik dan lebih konsisten dibandingkan IEEE Tipe-1 pada kondisi gangguan hubung singkat tiga fasa.

Kata Kunci- Power Sistem Stabilizer, Sistem Eksitasi IEEE Tipe 1, AC1A, Stabilitas Transien, Critical Clearing Time

I. PENDAHULUAN

Sistem eksitasi berfungsi mengatur tegangan terminal generator melalui pengendalian arus medan sehingga tegangan dan daya reaktif tetap berada dalam batas operasi. Pemasangan *Power System Stabilizer* (PSS) dengan sistem eksitasi diperlukan untuk meningkatkan respons dinamis dan menjaga kestabilan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan[1]. Salah satu aspek penting yang harus dianalisa adalah kestabilan sistem. Stabilitas sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu stabilitas dinamis dan stabilitas transien. Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan atau mengembalikan kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan kecil di sekitar titik kerjanya[2]. Adapun stabilitas transien adalah kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan kesinkronan generator ketika terjadi gangguan besar, seperti hubung singkat atau perubahan konfigurasi sistem secara mendadak[3].

Selain stabilitas transien, sistem tenaga juga harus memiliki stabilitas dinamis agar mampu kembali ke kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan kecil pada titik kerja[3]. Untuk meningkatkan kestabilan dinamis, PSS bekerja melalui *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan menghasilkan sinyal stabilisasi yang mampu meredam osilasi sudut rotor dan mempercepat pemulihan sistem[4]. Penambahan PSS dengan sistem eksitasi juga diketahui dapat meningkatkan *Critical Clearing Time* (CCT). *Critical Clearing Time* merupakan batas waktu maksimum pemutusan gangguan agar sistem tenaga listrik tetap stabil setelah mengalami gangguan transien. Jika gangguan dibersihkan sebelum CCT tercapai,

sistem dapat kembali ke kondisi stabil. Sebaliknya, jika waktu pembersihan gangguan melebihi CCT, sistem akan kehilangan kestabilan transien [5].

Dalam analisis kestabilan sistem tenaga digunakan berbagai model sistem eksitasi. IEEE Tipe 1 merupakan model eksitasi konvensional yang banyak digunakan karena memiliki struktur sederhana dan mampu merepresentasikan karakteristik dinamis sistem dengan baik[6]. Selain CCT, parameter *settling time* digunakan untuk mengevaluasi kecepatan sistem dalam kembali mencapai kondisi stabil setelah terjadi gangguan [7].

Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat berupa hubung singkat 3 fasa, kehilangan eksitasi dan kenaikan beban secara tiba-tiba. Di antara berbagai jenis gangguan tersebut, gangguan hubung singkat tiga fasa merupakan gangguan yang paling kritis karena menyebabkan penurunan daya listrik generator secara drastis sehingga sudut rotor berubah dengan cepat dan meningkatkan risiko hilangnya kesinkronan generator. Oleh karena itu, gangguan tiga fasa umumnya digunakan sebagai acuan dalam analisis stabilitas transien dan penentuan *Critical Clearing Time* (CCT).

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan *Power System Stabilizer* (PSS) dan IEEE tipe 1 dalam meningkatkan kestabilan transien sistem tenaga listrik. Efektivitas PSS dianalisis melalui perbandingan respon sistem dan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada kondisi sebelum dan sesudah pemasangan PSS. Gangguan tiga fasa dipilih karena merupakan gangguan yang paling kritis, sehingga mampu memberikan gambaran yang representatif terhadap kinerja PSS dalam mempertahankan kesinkronan generator.

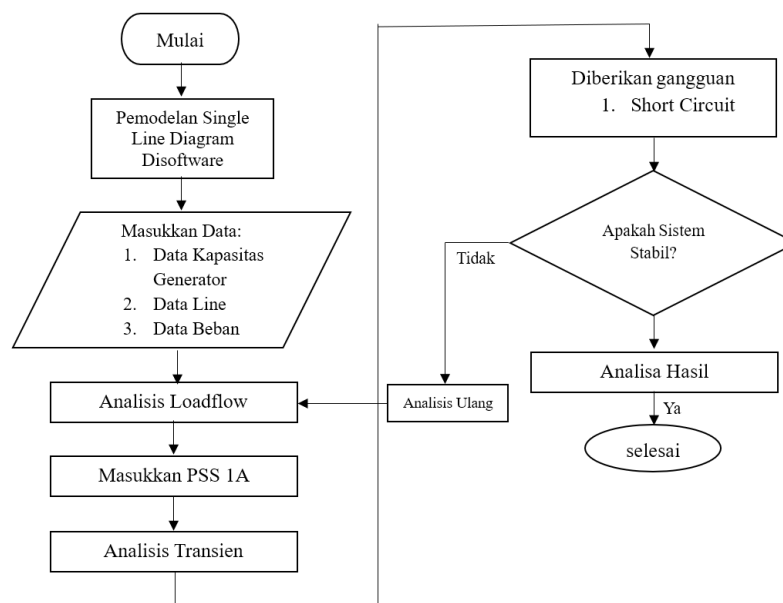
II. METODE PENELITIAN

A. Metode

Studi ini memodelkan sistem tenaga listrik 500 kV Area IV Jawa–Bali menggunakan perangkat lunak simulasi berdasarkan *single line diagram* yang diperoleh dari PT Jaya Construction Management. Sistem yang dimodelkan terdiri atas 18 unit generator, yaitu 6 unit di PLTGU Gresik, 4 unit di PLTGU Grati, dan 8 unit di PLTU Paiton, yang dihubungkan melalui 24 saluran transmisi 500 kV dengan 9 bus beban. Setiap generator dimodelkan menggunakan sistem eksitasi IEEE Tipe-1. Selanjutnya, *Power System Stabilizer* (PSS1A) dipasang pada generator dengan menggunakan sinyal kecepatan rotor (*rotor speed*) sebagai masukan untuk keperluan analisis pengaruh PSS terhadap kestabilan transien sistem.

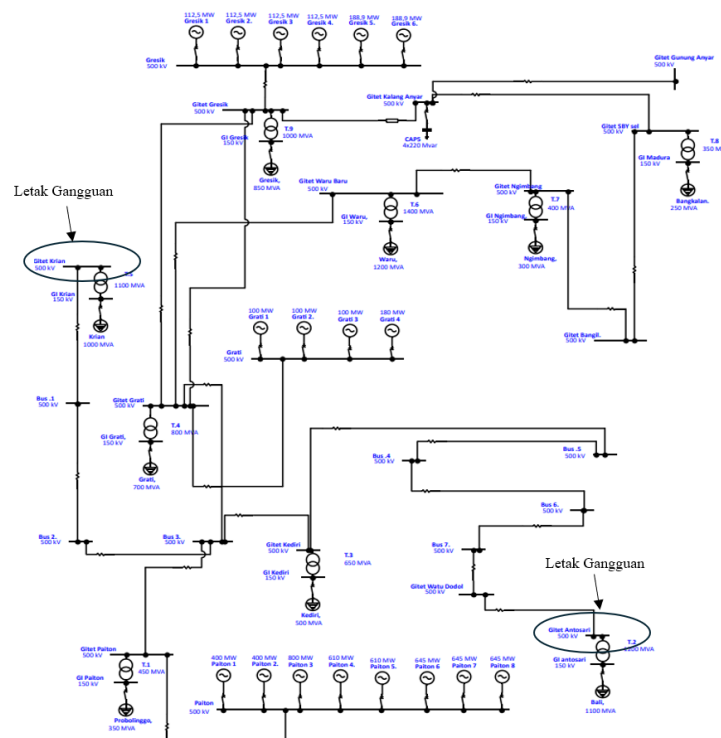
B. Flowchart Simulasi

Untuk mempermudah pemahaman terhadap tahapan Simulasi yang dilakukan, alur simulasi disajikan dalam bentuk *flowchart* seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Flowchart simulasi

Gambar 2 menunjukkan *single line diagram* sistem tenaga listrik 500 kV Area IV Jawa–Bali yang digunakan sebagai acuan dalam pemodelan sistem. Diagram tersebut menggambarkan konfigurasi jaringan yang terdiri atas generator, saluran transmisi, bus, dan beban yang saling terhubung.



Gambar 2 memperlihatkan lokasi skenario gangguan hubung singkat tiga fasa yang diterapkan pada Bus Krian 500 kV dan Bus Antosari 500 kV di sistem transmisi 500 kV Area IV. Kedua bus tersebut dipilih karena merupakan jalur penting dalam penyaluran daya antardaerah sehingga dapat merepresentasikan kondisi sistem saat mengalami gangguan. Pada simulasi, gangguan diberikan pada detik ke-2 (*fault*) dan dihilangkan pada detik ke-2,5 (*clear fault*). Skenario ini digunakan untuk mengevaluasi respons dinamik sistem tenaga listrik terhadap gangguan, meliputi perubahan sudut rotor generator, kemampuan redaman osilasi, serta kestabilan transien setelah penerapan *Power System Stabilizer* (PSS). Selanjutnya, hasil simulasi pada kedua lokasi gangguan dibandingkan antara kondisi *Base Case* dan *Design* untuk menilai efektivitas parameter PSS dalam meningkatkan performa dan kestabilan sistem setelah gangguan berhasil diatasi.

Table 1 Parameter Eksitasi Dan PSS

Kondisi Basecase				Kondisi Design			
Eksitasi IEEE Tipe 1		PSS1A		Eksitasi IEEE Tipe 1		PSS1A	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
$VR_{\max}$	17.5	V_{SI}	8.255	$VR_{\max}$	17.5	V_{SI}	3
$VR_{\min}$	-15.5	K_S	0.2	$VR_{\min}$	-15.5	K_S	0.9
$SE_{\max}$	1.65	$VST_{\max}$	-0.2	$SE_{\max}$	1.65	$VST_{\max}$	-0.9
$SE_{.75}$	1.13	$VST_{\min}$	0	$SE_{.75}$	1.13	$VST_{\min}$	0
$Efd_{\max}$	6.6	$VT_{\min}$	10	$Efd_{\max}$	6.6	$VT_{\min}$	0.2
K_A	400	TDR	0	K_A	150	TDR	0
K_E	1	T_1	0	K_E	1	T_1	0
K_F	0.04	T_2	0.201	K_F	0.02	T_2	0.76
T_A	0.05	T_3	0.05	T_A	0.05	T_3	0.1
T_E	0.95	T_4	0.137	T_E	0.95	T_4	0.76
T_F	1	T_5	0.05	T_F	1	T_5	0.1
T_P	0.005	T_6	0	T_P	0.005	T_6	1

1. Menghitung Pemutusan Waktu Kritis

Penentuan CCT dapat dianalisis menggunakan metode Equal Area Criterion (EAC). Metode ini menyatakan bahwa sistem akan tetap stabil apabila energi percepatan rotor selama gangguan sama dengan energi perlambatan rotor setelah gangguan dihilangkan. Kondisi tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$A_1 = A_2 \quad (1)$$

Keterangan:

A_1 = luas daerah percepatan (*accelerating area*)

A_2 = luas daerah perlambatan (*decelerating area*)

Luas percepatan diperoleh ketika daya mekanik lebih besar daripada daya listrik selama gangguan, sedangkan luas perlambatan terjadi setelah gangguan dihilangkan ketika daya listrik kembali lebih besar daripada daya mekanik.

Secara matematis, kedua luas tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta \quad (2)$$

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_e - P_m) d\delta \quad (3)$$

Keterangan:

P_m = daya mekanik masukan (pu)

P_e = daya listrik keluaran (pu)

δ_0 = sudut rotor awal

δ_c = sudut rotor saat gangguan dibersihkan (*critical clearing angle*)

δ_{max} = sudut rotor maksimum

Apabila luas percepatan sama dengan luas perlambatan ($A_1 = A_2$), maka sistem berada pada batas kestabilan transien. Sudut rotor pada kondisi tersebut disebut critical clearing angle (δ_c), yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai Critical Clearing Time (CCT). Pada sistem tenaga listrik multimachine, seperti sistem 500 kV Area IV Jawa-Bali, nilai CCT umumnya tidak dihitung secara analitis menggunakan EAC, melainkan diperoleh melalui simulasi *time-domain*. Meskipun demikian, prinsip Equal Area Criterion tetap digunakan sebagai dasar teori dalam menjelaskan batas kestabilan transien dan konsep penentuan CCT.

Pada metode Equal Area Criterion (EAC), tidak ada rumus langsung untuk menghitung waktu kritis t_{cr} atau CCT. EAC hanya menghasilkan sudut pemutusan kritis (*critical clearing angle*, δ_{cr}). Nilai waktu diperoleh dengan menghubungkan sudut rotor terhadap waktu melalui persamaan ayunan (*swing equation*).

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (4)$$

Persamaan ini merupakan swing equation pada sistem tenaga listrik, di mana:

H = konstanta inersia generator

ω_s = kecepatan sudut sinkron

δ = sudut rotor

P_a = daya percepatan

P_m = daya mekanik masukan

P_e = daya listrik keluaran

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jadi perhitungan menggunakan Equal Area Criterion yaitu

1. Diketahui Dalam Kondisi Basecase

$P_m = 0,8 \text{ p.u.}$

$\delta_0 = 15^\circ$

$\delta_c = 134^\circ$

$A_1 = 0,175$

Jadi Area A1 Kondisi Basecase

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \int_0^{15^\circ 13' 4''} (0.8 - 0.9 \sin \delta) d\delta \\
 A_1 &= 0.8(\delta_c - \delta_0) - 0.9[-\cos \delta]_{0.262}^{2.339} \\
 A_2 &= 2.2 \left[-\cos \left(\frac{134^\circ}{180^\circ} \pi \right) \right] - 0.8(\pi - 2.339) \\
 &= 2.2(1 - 0.694) - 0.8(0.803) \\
 &= 1.315 - 1.140 \\
 &= 0.175 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Jadi Area A2 Kondisi Basecase

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \int_{134^\circ}^{180^\circ} (2.2 \sin \delta - 0.8) d\delta \\
 A_2 &= 2.2[-\cos \delta]_{134^\circ}^{180^\circ} - 0.8(\pi - 2.339) \\
 &= 2.2(1 - 0.694) - 0.8(0.803) \\
 &= 1.315 - 1.140 \\
 A_2 &= 0.175 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

2. Diketahui Dalam Kondisi Design

$$P_m = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$\delta_0 = 15^\circ$$

$$\delta_c = 139^\circ$$

Jadi Untuk Area A1 Dalam Kondisi Design

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \int_{15^\circ}^{139^\circ} (0.8 - 0.9 \sin \delta) d\delta \\
 A_1 &= 0.8(\delta_c - \delta_0) - 0.9[-\cos \delta]_{15^\circ}^{139^\circ} \\
 139^\circ &= 2.426 \text{ rad} \\
 A_1 &= 0.8(2.426 - 0.262) - 0.9(-\cos 139^\circ + \cos 15^\circ) \\
 &= 1.731 - 1.541 \\
 A_1 &= 0.190 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Jadi Untuk Area A2 Dalam Kondisi Basecase

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \int_{139^\circ}^{180^\circ} (2.6 \sin \delta - 0.8) d\delta \\
 A_2 &= 2.6[-\cos \delta]_{139^\circ}^{180^\circ} - 0.8(\pi - 2.426) \\
 &= 2.6(1 - 0.755) - 0.8(0.716) \\
 &= 1.206 - 1.016 \\
 A_2 &= 0.190 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan metode Equal Area Criterion (EAC), diperoleh Sudut Pemutusan Kritis (Critical Clearing Angle, δ_{cr}) sebesar 134° pada kondisi Base Case dan 139° pada kondisi Design. Nilai δ_{cr} tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam perhitungan Critical Clearing Time (CCT) menggunakan swing equation.

Diketahui:

$$H = 8.1 \text{ s}$$

$$P_m = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Maka kecepatan sinkron

$$\begin{aligned}
 \omega_s &= 2\pi f \\
 &= 2\pi(50) \\
 &= 314.159 \text{ rad/s}
 \end{aligned}$$

Sehingga

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_s P_m}{2H} = \frac{314.159 \times 0.8}{2(8.1)} = 15.514 \text{ rad/s}^2$$

Dengan kondisi awal rotor

$$\delta_0 = 15^\circ = 0.2618 \text{ rad}$$

maka hasil integrasi swing equation adalah

$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_s P_m}{2H} \right) t^2$$

atau

$$\delta = 0.2618 + 7.757t^2$$

1. Kondisi Base Case

Diketahui

$$\delta_{cr} = 134^\circ$$

Konversi ke radian

$$\delta_{cr} = 134 \left(\frac{\pi}{180} \right) = 2.3387 \text{ rad}$$

Substitusi ke persamaan swing equation

$$2.3387 = 0.2618 + 7.757t^2$$

$$2.3387 - 0.2618 = 7.757t^2$$

$$2.0769 = 7.757t^2$$

$$t^2 = 0.2677$$

$$t_{cr} = 0.5174s$$

2. Kondisi Design

Diketahui

$$\delta_{cr} = 139^\circ$$

Konversi ke radian

$$\delta_{cr} = 139 \left(\frac{\pi}{180} \right) = 2.4260 \text{ rad}$$

Substitusi ke persamaan

$$2.4260 = 0.2618 + 7.757t^2$$

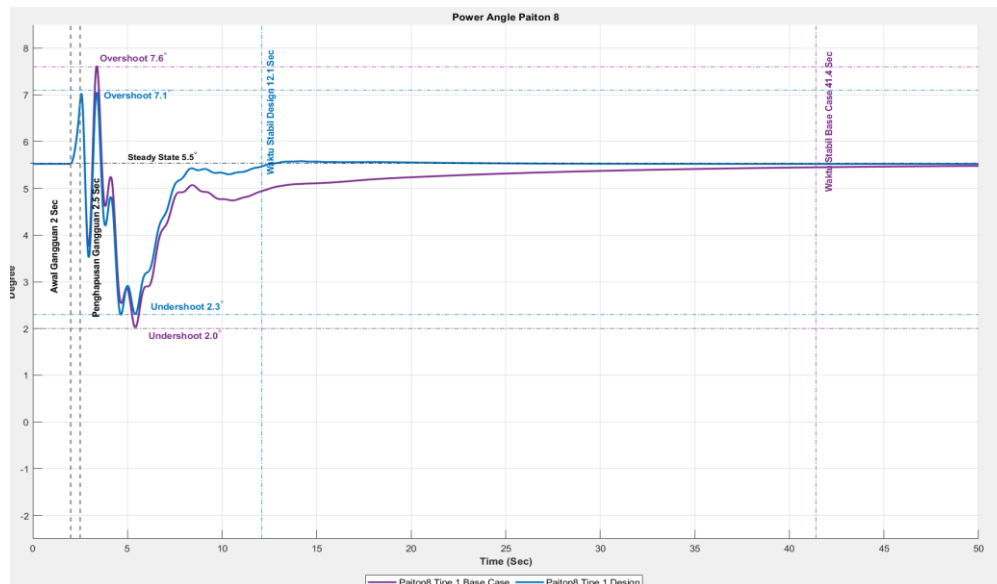
$$2.1642 = 7.757t^2$$

$$t^2 = 0.2790$$

$$t_{cr} = 0.5282s$$

Berdasarkan hasil tersebut, nilai Critical Clearing Time (CCT) pada kondisi Design lebih besar dibandingkan kondisi Base Case, yaitu meningkat dari 0,5174 s menjadi 0,5282 s atau mengalami peningkatan sebesar 2,09%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi Design memiliki margin kestabilan transien yang lebih baik karena sistem mampu mempertahankan sinkronisasi dalam waktu yang lebih lama sebelum gangguan harus dibersihkan.

Berdasarkan Gambar 3 hasil perhitungan Equal Area Criterion diperoleh sudut pemutusan kritis sebesar 134° pada kondisi Base Case dan 139° pada kondisi Design. Selanjutnya, menggunakan persamaan swing equation diperoleh Critical Clearing Time masing-masing sebesar 0,5174 s dan 0,5282 s. Pada simulasi, gangguan diputus pada detik ke-2,5 atau selama 0,5 s sejak gangguan dimulai pada detik ke-2. Karena waktu pemutusan gangguan (0,5 s) lebih kecil daripada nilai CCT pada kedua kondisi, sistem tetap berada dalam batas kestabilan transien. Hal ini dibuktikan oleh respon power angle pada Gambar 3 yang menunjukkan osilasi rotor mereda dan kembali menuju kondisi tunak tanpa kehilangan sinkronisasi. Selain itu, kondisi Design memiliki nilai CCT yang lebih besar sebesar 2,09% dibandingkan Base Case, yang menunjukkan peningkatan margin kestabilan transien sistem.



Gambar 3 Respons Power Angle Paiton 8 Dengan Waktu Pemutusan 2,5_{sec}

IV. KESIMPULAN

Penerapan PSS1A dengan parameter *Design* mampu meningkatkan redaman osilasi sudut rotor dibandingkan kondisi *Base Case*, sehingga generator lebih cepat kembali ke kondisi tunak setelah terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus Antosari dan Krian. Selain itu, kondisi *Design* juga meningkatkan daya maksimum ($P_{\max}$) yang dapat ditransfer sistem dari 7,50 pu menjadi 8,35 pu serta menaikkan *Critical Clearing Time* (CCT) dari 0,5174 s menjadi 0,5282 s atau sebesar 2,09%, yang menunjukkan peningkatan margin kestabilan transien. Secara keseluruhan, sistem eksitasi AC1A dengan parameter *Design* memberikan performa redaman osilasi yang lebih konsisten dibandingkan IEEE Tipe-1, meskipun kedua sistem sama-sama mampu meningkatkan kestabilan transien pada skenario gangguan hubung singkat tiga fasa yang disimulasikan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] W. Yang, C. Tu, F. Xiao, and J. Yu, "A Method to Improve Both Frequency Stability and Transient Stability of Virtual Synchronous Generators during Grid Faults," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16051769.
- [3] 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.
- [4] A. Nocoń and S. Paszek, "A Comprehensive Review of Power System Stabilizers," Feb. 01, 2023, *MDPI, Switzerland*. doi: 10.3390/en16041945.
- [5] T. T. Azeez and A. A. Abdelfattah, "Transient Stability Enhancement and Critical Clearing Time Improvement for Kurdistan Region Network using Fact Configuration," *Journal of Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 50–65, Oct. 2020, doi: 10.31026/j.eng.2020.10.04.
- [6] J.-H. Park and N. Young-Sik Baek, "Power System Transient Stability Simulation Based on OOP and TEF," doi: 10.1541/ieejpes.129.405.
- [7] V. Padiachy, U. Mehta, S. Azid, S. Prasad, and R. Kumar, "Two degree of freedom fractional PI scheme for automatic voltage regulation," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 30, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jestch.2021.08.003.