

Pengaturan Parameter *Power System Stabilizer* pada Pembangkit di Sistem IEEE 39 Bus

Hasna Satya Dini¹ dan Rizki Pratama Putra¹

¹Teknik Elektro, Fakultas Ketengalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Indonesia

hasna@itpln.ac.id, rizki@itpln.ac.id

Abstrak

Semakin kompleksnya sebuah sistem kelistrikan menyebabkan permasalahan yang muncul menjadi semakin kompleks. Salah satu isu yang penting untuk dilakukan kajian adalah terkait kestabilan sistem, khususnya kestabilan sinyal kecil. *Power System Stabilizer* merupakan komponen dari sistem eksitasi pembangkit yang dapat memberikan solusi dari permasalahan kestabilan sinyal kecil jika dilakukan pengaturan yang tepat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan observasi parameter *Power System Stabilizer* untuk meningkatkan kestabilan sinyal kecil pada sistem IEEE 39 Bus. *Power System Stabilizer* dapat meningkatkan batas kestabilan sistem dengan melakukan redaman pada osilasi untuk rentang frekuensi 0.2-2.5 Hz. Dalam penentuan pembangkit yang memerlukan pemasangan *Power System Stabilizer* dilakukan pemodelan generator menggunakan model *Heffron-Phillips* dimana dalam menentukan generator yang perlu dipasang PSS digunakan perhitungan faktor partisipasi. Penentuan parameter PSS menjadi krusial dimana, dengan menganalisa batas-batas kestabilan dan proses iterasi nilai faktor penguatan, konstanta waktu, dan washout filter dapat ditentukan. Berdasarkan analisis modal didapatkan bahwa G10 memiliki partisipasi tinggi dalam moda yang tidak stabil sehingga diputuskan perlu dilakukan pemasangan PSS pada generator tersebut. Setelah dilakukan pemasangan PSS didapatkan faktor redaman yang dihasilkan oleh pemasangan PSS masih kurang dari 5%. Melalui penggunaan metoda *Heffron-Phillips* diperlukan adanya langkah tambahan optimasi tambahan sehingga penentuan parameter PSS dapat memberikan hasil yang lebih baik.

Kata kunci: kestabilan sinyal kecil, *power system stabilizer*, metoda *bode plot*, IEEE 39 bus

Abstract

The more complex an electrical system is causing, the more complex problems will be anticipated. One of the problem that shall be studied extensively is system stability, especially small-signal stability. A power system stabilizer is a component of the excitation generation system that can solve small-signal stability problems if the proper settings are made. This study aims to observe the parameters of the Power System Stabilizer to improve small signal stability on the IEEE 39 Bus system. The Power System Stabilizer can increase the system stability limit by attenuating the oscillations for the frequency range of 0.2-2.5 Hz. The Heffron-Phillips model is employed to model the generator in Matlab. Participatory factor calculations are used to determine the generator that needs to be installed by PSS. PSS parameter control can be determined by analyzing the stability limits and the iteration process. Based on the modal analysis, it was found that G10 had a high partition in an unstable mode, so it was decided that installing PSS on the generator was necessary. After installing PSS, the damping factor produced by installing PSS was still less than 5%. Using Heffron-Phillips method requires additional adjustment steps to handle PSS parameters and provide better results.

Keywords: small signal stability, power system stabilizer, bode plot method, IEEE 39 bus

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik pada saat ini merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Energi listrik telah menjadi roda penggerak utama dalam sektor bisnis, industri, maupun rumah tangga. Meningkatnya kebutuhan listrik baik itu alam dunia bisnis maupun rumah tangga menyebabkan operasi generator yang mendekati batas kestabilannya. Operasi generator yang mendekati batas kestabilan dapat menyebabkan sistem kelistrikan menjadi rawan untuk terkena osilasi elektromekanik (P. Arunagirinathan, 2018). Beberapa contoh terjadinya gangguan elektromekanik adalah *blackout* yang terjadi pada tahun 2016 adalah sub-sistem Bengkulu yang terlepas dari sistem Sumatera bagian selatan yang menyebabkan hilangnya pasokan listrik di area tersebut (Dini, 2017). Gangguan IBT yang seharusnya mampu ditanggulangi oleh *defense scheme* ternyata menyebabkan *blackout* pada subsistem Bengkulu akibat adanya gangguan sinyal kecil.

Pengaturan sistem eksitasi yang tepat mampu untuk memberikan redaman sinyal kecil ketika terjadi gangguan pada sistem (Chandan Kumar, 2020). Penggunaan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) untuk melakukan pengaturan tegangan secara *automatic* dan cepat mampu meningkatkan kestabilan tunak dari sistem transmisi. Namun, AVR memiliki efek yang buruk pada kestabilan transien karena meningkatkan keterlambatan fasa pada sistem (Kharrazi, 2015). Osilasi pada

Info Makalah:

Dikirim : 05-31-23;

Revisi 1 : 06-19-23;

Diterima : 06-19-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : hasna@itpln.ac.id

frekuensi rendah sekitar 0,2–2,5 Hz dapat terjadi pada sistem akibat gangguan besar seperti hubung singkat fasa-tanah.

Untuk menghindari permasalahan kestabilan tersebut digunakan *Power System Stabilizer* yang merupakan komponen dari sistem eksitasi pembangkit. PSS mampu memberikan sinyal tambahan dalam menjaga stabilitas sebuah sistem tenaga (Zea, 2013b). PSS memberikan redaman pada sistem melalui modulasi sistem eksitasi dengan menambahkan komponen torka elektrik yang satu fasa dengan perubahan kecepatan. PSS mampu melakukan redaman osilasi untuk frekuensi 0,1 sampai 2,5 Hz (Others, 1994). Pengaturan parameter *Power System Stabilizer* harus dilakukan secara tepat agar mampu mengompensasi keterlambatan fasa akibat *exciter*, generator, dan sistem tenaga.

Terdapat beberapa metoda yang dapat digunakan pada pengaturan parameter *Power System Stabilizer* antara lain metoda linearisasi, *eigenvalue sensitivity analysis*, *bode plot*, Lyapunov maupun optimasi seperti *genetic algorithm* (Zea, 2013b). Pemilihan metoda yang digunakan dapat didasarkan pada besar kecilnya sistem tenaga listrik yang menjadi objek penelitian. Di mana pembangunan optimisasi dapat dilakukan ketika sistem dihadapi adalah sistem yang besar dan kompleks. Pada penelitian di mana digunakan sistem IEEE 39 bus (G. Tricarico, 2023), akan digunakan metoda *bode plot* dalam melakukan penentuan parameter dari PSS untuk meningkatkan stabilitas sinyal kecil.

1.1. Sistem IEEE 39 Bus

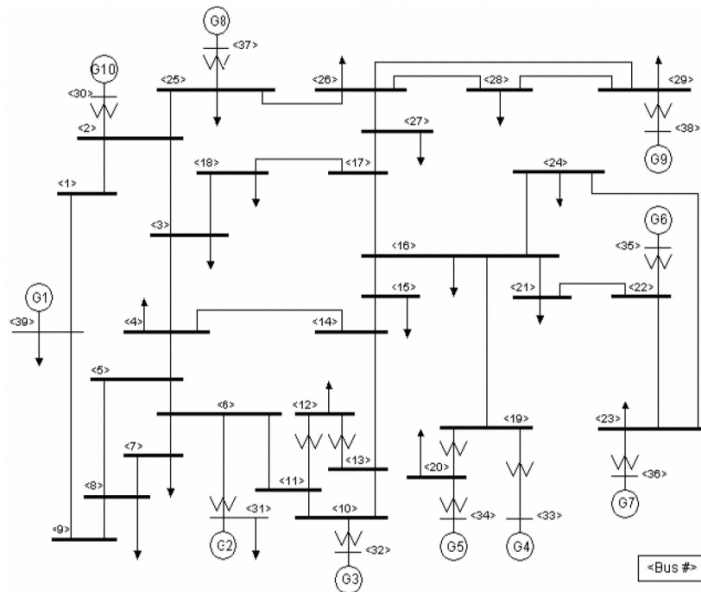
Sistem IEEE 39 Bus merupakan sistem contoh yang disediakan oleh IEEE yang dapat digunakan untuk melakukan percobaan. Sistem ini terdiri dari 10 generator, 19 beban, dan 39 Bus. Total pembebanan pada sistem ini adalah 320 MW. Terdapat 3 level tegangan yaitu 345 kV, 230 kV, dan 16,5 kV.

Tabel 1. Data Pembebanan Sistem IEEE 39 Bus.

Beban	Daya Aktif (MW)	Daya reaktif (MVAR)	Beban	Daya Aktif (MW)	Daya reaktif (MVAR)
Load 03	322	2,4	Load 23	247,5	84,6
Load 04	500	184	Load 24	308,6	-92,2
Load 07	233,8	84	Load 25	224	47,2
Load 08	522	176	Load 26	139	17
Load 12	7,5	88	Load 27	281	75,5
Load 15	320	153	Load 28	206	27,6
Load 16	329	32,3	Load 29	283,5	26,9
Load 18	158	30	Load 31	9,2	4,6
Load 20	628	103	Load 39	1104	250
Load 21	274	115			

Tabel 2. Data Pembangkitan Sistem IEEE 39 Bus.

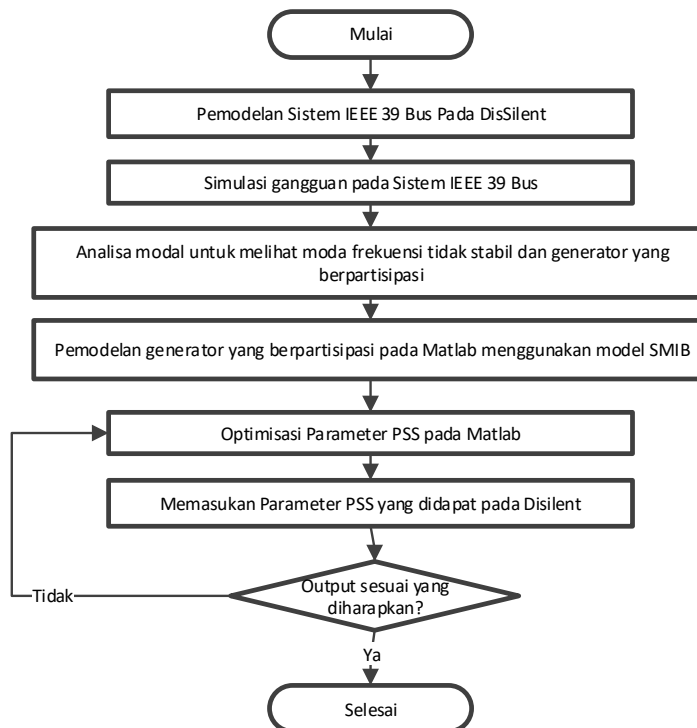
Pembangkit	Daya Aktif (MW)
G 01	1000
G 02	<i>Slack bus</i>
G 03	650
G 04	632
G 05	254
G 06	650
G 07	560
G 08	540
G 09	830
G 10	250



Gambar 1. Sistem Kelistrikan IEEE 39 Bus (M. Cupelli, 2012).

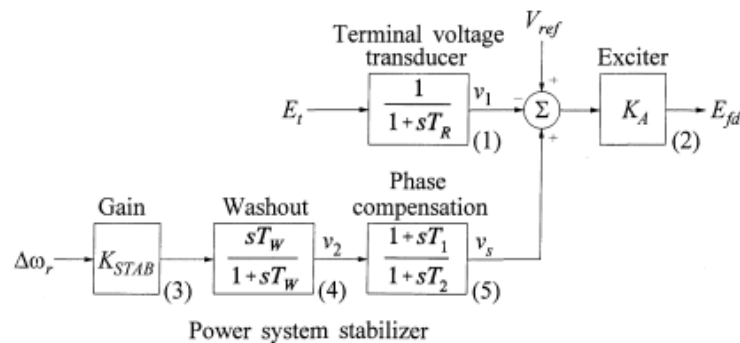
2. Metode

Dalam pengerjaan penelitian ini dilakukan pada kondisi normal. Adapun algoritma yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai Gambar 2. Langkah pertama dalam percobaan ini adalah dengan melakukan pemodelan sistem IEEE 39 bus untuk dilakukan simulasi gangguan. Tujuan dari Simulasi gangguan ini untuk mendapatkan respon osilasi sistem untuk nantinya dilakukan identifikasi moda tidak stabil dan generator mana yang memberikan partisipasi paling tinggi dalam moda frekuensi yang menyebabkan ketidakstabilan sinyal kecil. Faktor partisipasi sendiri merupakan indikasi seberapa berpengaruhnya generator pada suatu moda frekuensi. Faktor partisipasi ini digunakan untuk menentukan generator yang krusial untuk dilakukan penempatan atau penyetelan ulang parameter PSS. Apabila terdapat generator dengan faktor partisipasi nol pada sebuah moda, generator tersebut tidak memberikan implikasi apapun pada moda tersebut. Sedangkan jika faktor partisipasinya bernilai real positif, penambahan redaman pada generator akan meningkatkan rasio redaman pada moda tersebut. Namun apabila faktor partisipasinya bernilai real negatif, penambahan redaman pada generator akan mengurangi redaman dari generator.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Setelah dilakukan identifikasi generator yang berpengaruh dilakukan pemodelan generator pada Matlab menggunakan model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Sistem SMIB yang dilengkapi dengan blok diagram sistem eksitasi dalam hal ini adalah AVR dan PSS berfungsi untuk melakukan *tuning* parameter PSS. Blok diagram dari PSS dapat diilustrasikan dengan Gambar 3. Terdapat tiga komponen utama dari PSS yaitu, blok kompensator fasa, blok *washout* sinyal, dan blok gain. Blok kompensator fasa berfungsi untuk mengkompensasi fasa *lag* antara input *exciter* dan torka elektrik generator. Blok *washout* sinyal berfungsi sebagai *filter high pass* dengan konstanta waktu T_w . Blok ini berfungsi untuk mencegah sinyal pada keadaan tunak untuk diproses oleh PSS sehingga dapat mengubah tegangan terminal. Pemilihan nilai T_w harus memperhatikan lebar frekuensi dari sinyal input yang diinginkan untuk diproses namun tidak menyebabkan terjadinya ekskursi pada tegangan generator pada saat keadaan *island*. Blok gain menentukan besaran redaman yang diberikan oleh PSS. Umumnya konstanta gain (K_{stab}) diatur setinggi mungkin.



Gambar 3. Blok Diagram yang Merepresentasikan AVR dan PSS (Others, 1994).

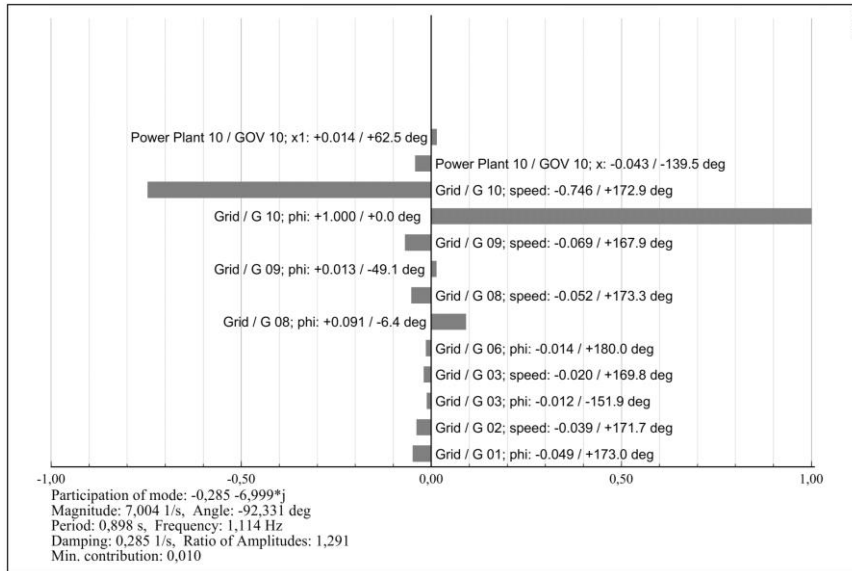
2.1. Identifikasi Moda Redaman dan Faktor Partisipasi

Identifikasi moda frekuensi yang tidak stabil dilakukan dengan menggunakan analisis modal. Moda frekuensi yang tidak stabil adalah moda dengan rasio redaman kurang dari 5% (Padiyar, 1996). menunjukkan bahwa moda osilasi inter-area dan moda osilasi lokal. Di mana frekuensi teredam untuk moda osilasi inter-area adalah 0,5 Hz, sedangkan pada moda osilasi lokal 0,7 – 2 Hz. Moda 00043 dan Moda 00044 memiliki rasio redaman 0,041, sehingga dapat digolongkan pada moda tidak stabil. Kedua moda ini memiliki frekuensi teredam 1,114 dimana berada pada rentang frekuensi untuk osilasi mode lokal.

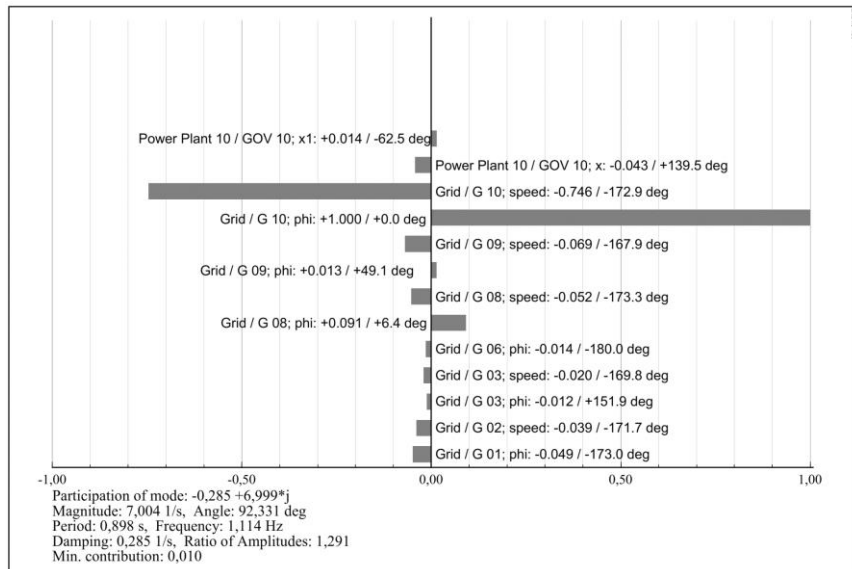
Pada moda yang tidak stabil dilakukan analisa faktor partisipasi untuk melihat generator apa yang memiliki peran yang tinggi dalam ketidakstabilan sistem. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan plot garis dari faktor partisipasi untuk masing-masing moda. Generator G10 memiliki faktor partisipasi yang paling tinggi sehingga diputuskan *power system stabilizer* perlu dipasang di generator tersebut.

Tabel 3. Analisa Nilai Eigen pada Sistem IEEE 39 Bus.

Mode	Nilai Eigen Real	Nilai Eigen Imajiner	Frekuensi Teredam	Rasio Redaman
Moda 00043	-0,285	6,999	1,114	0,041
Moda 00044	-0,285	-6,999	1,114	0,041
Moda 00045	-0,385	6,615	1,053	0,058
Moda 00046	-0,385	-6,615	1,053	0,058
Moda 00039	-0,464	7,518	1,196	0,062
Moda 00040	-0,464	-7,518	1,196	0,062
Moda 00047	-0,420	6,152	0,979	0,068
Moda 00048	-0,420	-6,152	0,979	0,068
Moda 00041	-0,576	7,477	1,190	0,077
Moda 00042	-0,576	-7,477	1,190	0,077
Moda 00035	-0,696	8,939	1,423	0,078
Moda 00036	-0,696	-8,939	1,423	0,078
Moda 00068	-0,314	4,012	0,639	0,078
Moda 00069	-0,314	-4,012	0,639	0,078
Moda 00037	-0,739	8,867	1,411	0,083
Moda 00038	-0,739	-8,867	1,411	0,083
Moda 00033	-0,820	9,111	1,450	0,090
Moda 00034	-0,820	-9,111	1,450	0,090
Moda 00028	-16,337	3,547	0,565	0,977
Moda 00029	-16,337	-3,547	0,565	0,977



Gambar 4. Faktor Partisipasi Moda Frekuensi 00043.



Gambar 5. Faktor Partisipasi Moda Frekuensi 00044.

2.2. Pemodelan Generator G10 pada Matlab

Pemodelan generator dilakukan untuk dapat melihat keterlambatan respon sistem generator, *exciter*, dan sistem tenaga. Model yang digunakan dalam pemodelan ini adalah model Heffron–Phillips. Pada pemodelan ini perlu diketahui data–data awal mesin dan jaringan antara lain impedansi saluran ke *infinite* bus (R dan X), aditansi beban loka (G dan B), reaktansi tunak generator (X_d dan X_q) dan rating generator (Rifkiya, 2008).

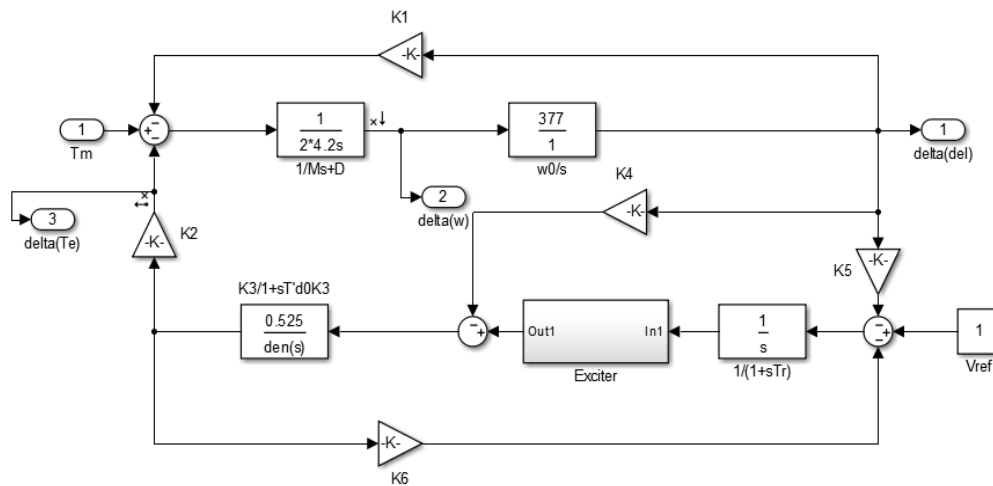
Berdasarkan perhitungan didapatkan konstanta Heffron–Phillips untuk generator G10 pada

Tabel 4. Nilai konstanta–konstanta tersebut selanjutnya dimasukkan ke dalam blok diagram Heffron–Phillips yang dimodelkan pada *Simulink* seperti pada Gambar 6.

Tabel 4. Konstanta Heffron–Phillips

Konstanta	Nilai
K1	0.778
K2	0.754
K3	0.7525
K4	0.76486
K5	0.50561
K6	-0.08629
K5	-0.161
K6	0.629

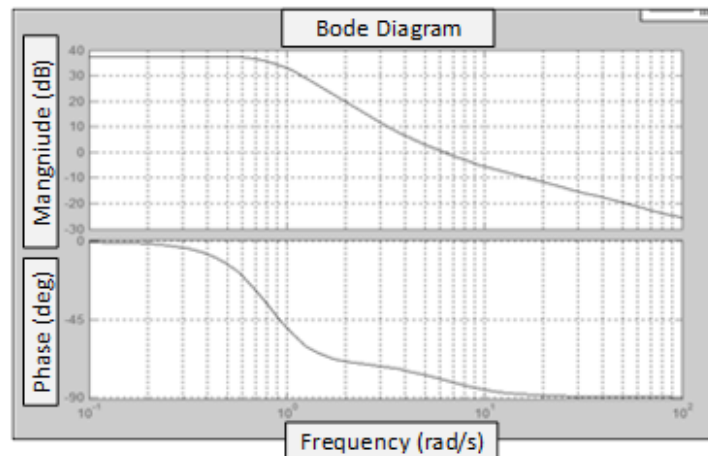
generator G10.



Gambar 6. Pemodelan Generator G10 dengan Pendekatan Heffron–Phillips.

2.3. Penentuan Konstanta Waktu untuk Kompensator PSS

Pada PSS yang digunakan, terdapat empat konstanta waktu (T_1, T_2, T_3, T_4) yang perlu diidentifikasi nilainya. Dasar dari penentuan konstanta waktu ini adalah identifikasi keterlambatan fasa pada dari GEP. Bode diagram dari GEP ditinjau dengan melihat $\Delta\omega$ sebagai input dan ΔT sebagai output.



Gambar 7. Respon Frekuensi pada Generator G10.

Penentuan konstanta waktu kompensator harus memenuhi aturan berikut (Padiyar, 1996)

- Fasa lag terkompensasi $P(s) = GEP(s)PSS(s)$ harus melebihi 90° pada frekuensi sekitar 3.5 Hz
- Fasa lag terkompensasi pada moda lokal harus berada di bawah 45° , lebih baik apabila dapat di bawah 20°
- Penguatan kompensator pada frekuensi tinggi harus diminimalkan

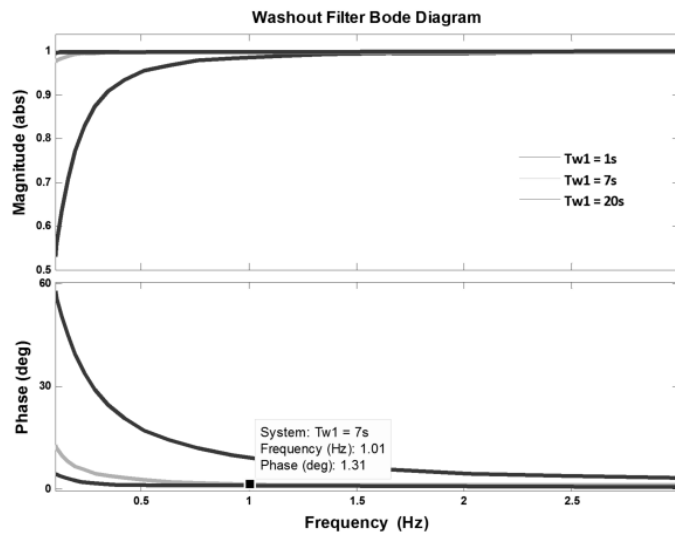
Berdasarkan syarat-syarat tersebut didapatkan konstanta waktu T_1, T_2, T_3, T_4 sebagai berikut

Tabel 5. Konstanta Waktu pada Kompensator Fasa PSS.

T_1	T_2	T_3	T_4
0.3	0.1	0.3	0.4

2.4. Penentuan Konstanta Waktu untuk Filter Washout PSS

Konstanta Washout berperan sebagai penyaring frekuensi rendah. Di mana Penentuan konstanta Washout akan bergantung dari frekuensi yang ingin diredam. Semakin rendah frekuensi yang akan diredam, nilai konstanta waktu harus semakin tinggi. Namun nilai konstanta redaman yang tinggi dapat menyebabkan bekerjanya PSS pada waktu yang tidak diharapkan. Gambar 8 menunjukkan diagram bode filter washout. Ketika $T_w = 7s$, nilai kontribusi fasa bernilai 1° untuk semua frekuensi.



Gambar 8. Bode Diagram Filter *Washout* (Zea, 2013a).

2.5. Penentuan Penguatan PSS

Penguatan PSS yang digunakan umumnya merupakan 1/3 dari penguatan maksimalnya (Dini, 2017). Untuk mengetahui nilai penguatan PSS dilakukan analisis *root locus* dari diagram GEP yang telah dilengkapi PSS. Penguatan yang diberikan pada PSS adalah 1/3 dari penguatan maksimal sebelum terjadinya ketidakstabilan. Pada kasus ini, nilai gain yang diberikan adalah 1.

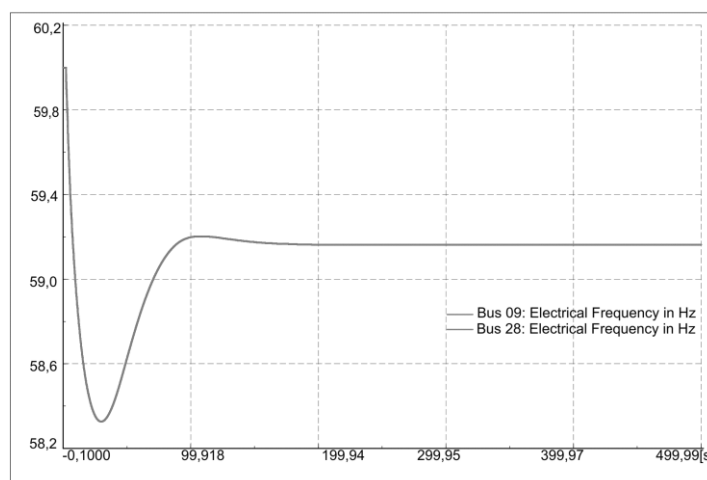
3. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan pemasangan PSS pada Generator G10 dilakukan kembali analisis modal pada IEEE 39 Bus dan uji coba pelepasan generator pada sistem. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah sistem masih dapat menjaga kestabilannya ketika terjadi gangguan. Tabel 6 menunjukkan bahwa setelah dilakukan pemasangan PSS, moda 43 dan moda 44 masih memiliki rasio redaman kurang dari 5%.

Tabel 6. Analisis Modal Setelah Terjadi Gangguan.

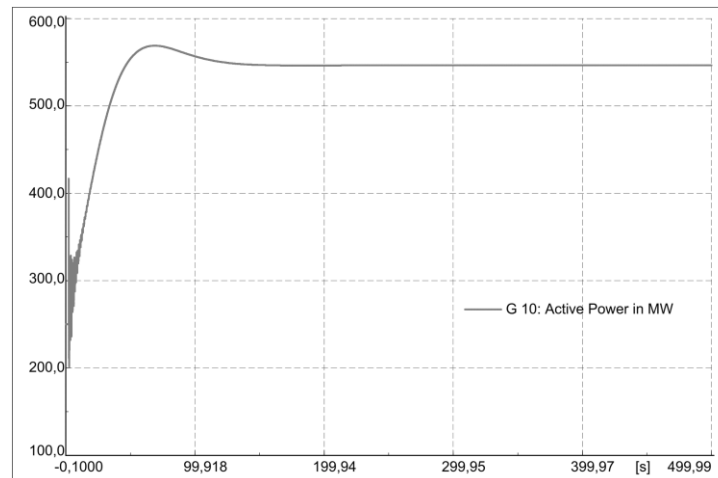
Mode	Nilai Eigen Real	Nilai Eigen Imajiner	Frekuensi Teredam	Rasio Redaman
Moda 00043	-0,285	6,999	1,114	0,041
Moda 00044	-0,285	-6,999	1,114	0,041

Ketika terjadi gangguan lepas generator G8, setelah penambahan PSS sistem masih dapat kembali ke kestabilannya seperti pada Gambar 9. Hal ini ditandai dengan frekuensi sistem yang dapat kembali ke nilai 59,2 Hz di mana nilai ini masih berada di batas ambang aman frekuensi.



Gambar 9. Frekuensi Sistem Setelah Lepasnya Generator G8.

Sedangkan daya keluaran pada generator G10, meningkat untuk membantu memenuhi kekurangan daya akibat lepasnya generator. Kenaikan daya yang terjadi tidak membuat generator hilang kestabilannya.



Gambar 10. Daya Aktif Keluaran G10 Setelah Lepasnya Generator G8.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan simulasi yang dilakukan Generator G10 merupakan generator yang berpartisipasi dalam moda yang tidak stabil. Perlu dilakukan pemasangan PSS pada generator ini untuk meredam moda yang tidak stabil. Di mana pemasangan PSS mampu membantu mengembalikan sistem ke ambang frekuensi stabil yaitu sekitar 59.2 Hz, namun faktor redaman pada moda yang berosilasi masih di bawah 5%. Sehingga diperlukan adanya studi lanjutan yang mencakup optimasi dalam penentuan parameter PSS karena dalam sistem IEEE 39 bus penggunaan metoda *bode plot* tidak cukup untuk menyelesaikan solusi ketidakstabilan sinyal kecil.

Daftar Pustaka

- Chandan Kumar, S. G., Saurav Sahay, Alok Pratap Singh, Akash Modi, Surajit Banerjee. (2020). *Experience of PSS Tuning in Indian Power System*. Paper presented at the National Power Systems Conference (NPSC), Gandhinagar, India.
- Dini, H. S. (2017). *Analisis Blackout Pasca Gangguan yang Terjadi Pada Subsistem Bengkulu*. Retrieved from Bandung:
- G. Tricarico, R. W., M. Dicorato, G. Forte, F. Gonzalez-Longatt and J. L. Rueda. (2023). *A Modified Version of the IEEE 39-bus Test System for the Day-Ahead Market*. Paper presented at the 2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Kharrazi, A. (2015). *Tuning of Power System Stabilizer in Single Machine Infinite Bus (SMIB) using Genetic Algorithm and Power Factory Modal Analysis*.
- M. Cupelli, C. D. C. a. A. M. (2012). *Voltage stability indices comparison on the IEEE-39 bus system using RTDS*. Paper presented at the 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, New Zealand.
- Others, P. K. a. (1994). *Power System Stability and Control*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute.
- P. Arunagirinathan, Y. W., A. Arzani and G. K. Venayagamoorthy. (2018). *Wide-Area Situational Awareness based Power System Stabilizer Tuning with Utility Scale PV Integration*. Paper presented at the 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC), Charleston, SC, USA.
- Padiyar, K. R. (1996). *Power System Dynamic and Control*: B. S. Publication.
- Rifkiya, G. (2008). *Peningkatan Kestabilan Dinamik Sistem Sumatera dengan Power System Stabilizer*. Retrieved from Bandung:
- Zea, A. A. (2013b). *Power System Stabilizers for The Synchronous Generator Tuning and Performance Evaluation*. Retrieved from Guteborg, Sweden