

# Analisis Pengaruh *Static Synchronous Series Compensator* Terhadap Kestabilan Transien Menggunakan Metode Nyquist

## (*Analysis of the Static Synchronous Series Compensator's Effect on Transient Stability Using the Nyquist Method*)

Mohammad Noor Hidayat<sup>1</sup>, Syarifatul Izza<sup>2</sup>, Ratna Ika Putri<sup>3</sup>

**Abstract**—Loss of synchronization causes a generator not in steady state condition, causing system instability. In this paper, Nyquist method is used to determine the transient stability of a synchronous generator using the Nyquist curve. The system is unstable if the  $G(j\omega)$  curve is further away from the point  $-1 + j0$ , while the gain margin value is below 6 dB and the phase margin has a value below  $30^\circ$ . The response of the system shows that the rotor angle oscillation on the generator is not synchronous, while the power angle experiences irregular transients so that the power angle increases until it cannot return to its steady state position. By using the Static Series Synchronous Compensator (SSSC) filter, the rotor angle oscillation response after 0.1 seconds begins to stabilize at an angle of  $50^\circ$ . The effect of the SSSC filter also affects the bus voltage oscillations from 0.15 seconds to 0.05 seconds and the real power oscillations from 0.13 seconds to 0.06 seconds.

**Intisari**—Kehilangan sinkronisasi menyebabkan generator tidak dalam keadaan *steady state* sehingga menyebabkan ketidakstabilan sistem. Dalam makalah ini, metode Nyquist digunakan untuk menentukan kestabilan transien pada generator sinkron menggunakan kurva Nyquist. Sistem tidak stabil apabila kurva  $G(j\omega)$  semakin menjauhi titik  $-1+j0$ , sedangkan nilai *gain margin* bernilai 6 dB dan *phase margin* memiliki nilai di bawah  $30^\circ$ . Respons sistem menunjukkan bahwa osilasi sudut rotor pada generator tidak dalam keadaan sinkronnya, sedangkan sudut daya mengalami transien yang tidak beraturan, sehingga semakin lama *power angle* akan semakin naik hingga tidak dapat kembali ke *posisi steady state*-nya. Dengan menggunakan filter *Static Series Synchronous Compensator* (SSSC), respons osilasi sudut rotor setelah 0,1 detik mulai stabil pada sudut sebesar  $50^\circ$ . Pengaruh filter SSSC juga berdampak pada osilasi tegangan bus, dari 0,15 detik menjadi 0,05 detik, dan osilasi daya nyata dari 0,13 detik menjadi 0,06 detik.

**Kata Kunci**— Generator Sinkron, Kestabilan Transien, Metode Nyquist, SSSC.

### I. PENDAHULUAN

Kemampuan sistem tenaga untuk kembali pada kondisi normalnya jika terjadi gangguan disebut sebagai kestabilan transien [1]. Gangguan yang terjadi dapat berupa gangguan kecil atau gangguan besar. Gangguan pada transmisi, perubahan beban yang mendadak, kehilangan sinkronisasi, dan

perbaikan saluran merupakan gangguan besar. Sedangkan gangguan kecil dapat dikatakan sebagai gangguan yang dapat ditangani, seperti halnya perubahan pengaturan tegangan otomatis dalam sistem eksitasi, sehingga sistem dapat kembali pada kondisi normalnya. Sistem yang mengalami gangguan kecil terus-menerus yang dapat berdampak pada gangguan besar mengakibatkan sistem tidak stabil [2].

Studi stabilitas transien melibatkan gangguan besar, yaitu hilangnya sinkronisasi antar pembangkit (generator). Oleh karena itu, perlu dilakukan pemodelan generator [3]. Penelitian tersebut menyatakan bahwa analisis kestabilan transien menggunakan diagram Nyquist menunjukkan sistem tidak stabil. Sedangkan respons sistem menunjukkan bahwa osilasi semakin memburuk hingga mengakibatkan hilangnya sinkronisasi yang dapat berdampak negatif pada proses produksi di industri pembangkit tersebut.

Perbaikan ketidakstabilan transien menggunakan filter *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) untuk meningkatkan stabilitas sudut rotor dan redaman osilasi daya dalam sistem terbukti efektif [4]. Karakteristik operasi dan kinerja dasar SSSC serta hasil perbandingan dengan perangkat lain menyatakan bahwa SSSC sangat cepat dan efektif dalam mengendalikan aliran daya dan sistem tidak kehilangan sinkronisasinya [5]. Selanjutnya, implementasi SSSC dalam sistem IEEE 5 bus dengan membandingkan sebelum pemasangan dan sesudah pemasangan filter SSSC menunjukkan bahwa pengurangan kerugian dan peningkatan profil tegangan bus yang dicapai setelah kompensasi filter SSSC tersebut menunjukkan hasil yang signifikan [6].

Berdasarkan hasil-hasil penelitian di atas, makalah ini ditulis dengan tujuan menganalisis pengaruh penambahan SSSC terhadap kestabilan transien tiga generator sinkron yang dioperasikan paralel setelah terjadinya gangguan. Metode yang dipakai adalah metode Nyquist.

### II. KESTABILAN SISTEM TENAGA

Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan andal jika memiliki beberapa kriteria, meliputi: (1) *reliability*, yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus; (2) *quality*, yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi; dan (2) *stability*, yaitu kemampuan sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan. Dalam sistem tenaga listrik yang baik, ketiga kriteria tersebut harus dipenuhi, yaitu sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran untuk tegangan dan frekuensi sesuai

<sup>1,2,3</sup> Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, PO BOX Malang, INDONESIA 65141 (telp: 0341-404424; fax: 0341-404420; e-mail: moh.noor@polinema.ac.id, syarifatul\_izza@polinema.ac.id, ratna.ika@polinema.ac.id)

dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan [7].

Analisis kestabilan biasanya digolongkan ke dalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan, yaitu kestabilan keadaan tetap (*steady state stability*), kestabilan dinamis (*dynamic stability*), dan kestabilan peralihan (*transient stability*). Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika mengalami gangguan. Stabilitas tergantung pada kondisi pengoperasian awal sistem dan tingkat keparahan gangguan. Biasanya sistem diubah sehingga operasi *steady state* setelah gangguan berbeda dari sebelum gangguan. Sistem dirancang dan dioperasikan agar stabil untuk serangkaian kemungkinan gangguan yang terjadi. Gangguan yang biasanya dipertimbangkan adalah hubung singkat dari berbagai jenis, meliputi *phase to ground*, *phase to phase to ground*, atau *symmetrical three phase* [1], [2].

Suatu sistem dikatakan stabil apabila tercipta kondisi tanggapan (*response*) sistem bersifat terbatas jika diberikan masukan sistem yang bersifat terbatas pula. Terbatas yang dimaksud di sini adalah harga maksimumnya terbatas. Dalam analisis kestabilan, seringkali digunakan akar-akar dari persamaan denominator (penyebut). Karena seringnya penggunaan persamaan denominator ini untuk menganalisis karakteristik kestabilan suatu sistem, maka persamaan denominator ini diberi nama persamaan karakteristik. Berikut adalah fungsi transfer sistem *loop* tertutup, ditunjukkan dalam (1) [8]-[10].

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \tag{1}$$

Dengan menggunakan persamaan karakteristik tersebut, sistem dapat ditentukan dengan mudah. Jika sistem stabil, maka karakteristik tanggapan transien sangat bermanfaat.

Sebelum menentukan fungsi alih pada sistem, pemodelan sistem generator ini dilakukan menggunakan persamaan linear diferensial dan transformasi Laplace seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1.

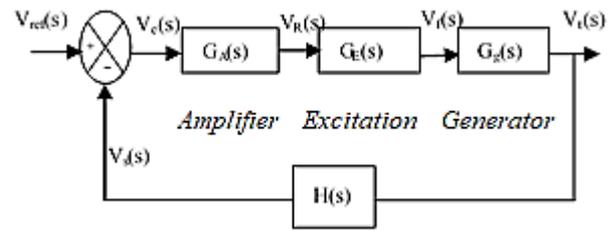
Setelah sebuah kurva fungsi alih diperoleh, dapat ditentukan sistem stabil atau tidak stabil. Untuk kasus  $G(s)H(s)$  tak memiliki *pole/zero* pada sumbu imajiner  $j\omega$ , bila fungsi alih *loop* terbuka  $G(s)H(s)$  memiliki  $k$  *pole* di sebelah kanan bidang  $s$  dan  $\lim_{s \rightarrow \infty} G(s)H(s) = \text{konstan}$ , maka sistem stabil bila kurva  $G(j\omega)H(j\omega)$  mengelilingi titik  $-1 + j0$  sebanyak  $k$  kali berlawanan arah jarum jam. Agar stabil, titik  $-1 + j0$  harus terletak di luar daerah yang diarsir seperti pada Gbr. 2.

Gbr. 2 menunjukkan kurva magnitude  $G(j\omega)$  terhadap sudut fase  $G(j\omega)$  pada koordinat polar dengan  $\omega$  dinaikkan dari 0 sampai tak hingga. Kriteria Nyquist menyatakan bahwa sistem akan stabil apabila bidang setelah kanan kurva  $G(s)H(s)$  tidak melingkupi titik  $(-1,0)$ . Tingkat kestabilan sistem dapat diukur dengan *gain margin* dan *phase margin*.

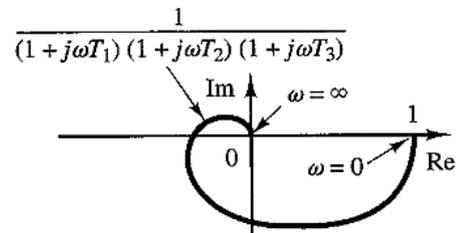
$$\text{Gain Margin (GM)} = \frac{1}{a} = 20 \log_{10} a \text{ (dB)} \tag{2}$$

$$\text{Phase Margin (GM)} = -180 + \theta \tag{3}$$

Untuk melihat kestabilan transien pada suatu sistem adalah dengan melihat tanggapan transien "optimum" apabila *phase margin* 30° sampai 60° dan *gain margin* > 6 dB.



Gbr. 1 Diagram blok pemodelan sistem generator [3].



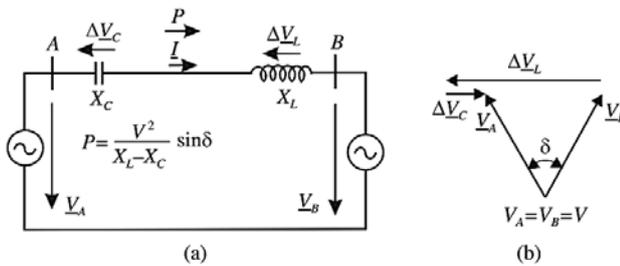
Gbr. 2 Kurva fungsi alih terbuka  $G(s)H(s)$  [8]-[10].

Mengacu pada penelitian sebelumnya [3], respons osilasi yang semakin buruk akibat gangguan yang terjadi di awal menyebabkan sistem terpecah dan tidak stabil, sehingga beberapa daerah terputus dengan hilangnya suplai daya ke sejumlah konsumennya yang menyebabkan frekuensi menurun. Dilihat dari osilasi respons yang meningkat akibat gangguan besar atau akibat hilangnya sinkronisasi, pada akhirnya dapat mengakibatkan osilasi semakin buruk dan sistem *collapse* [11].

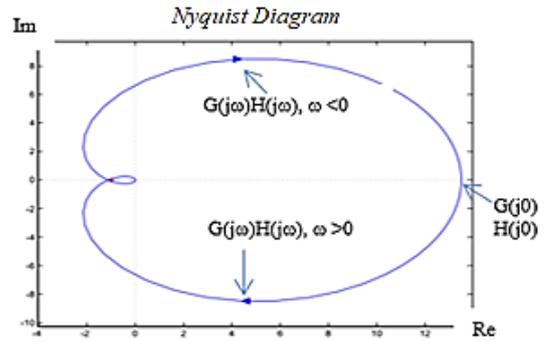
Untuk menghilangkan osilasi daya dalam daya sistem, sinyal tambahan dapat ditumpangkan sebagai sinyal kontrol aliran daya. Pengontrol seperti redaman osilasi daya atau *Power Oscillation Damping (POD)*, *Proportional Integral (PI)*, dan *Proportional Integral Derivative (PID)* digunakan untuk pengontrol *Flexible AC Transmission System (FACTS)* [4]-[6]. Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan elektronika daya memungkinkan digunakannya pengontrol FACTS dalam sistem tenaga. Pengontrol FACTS sangat berguna untuk peningkatan stabilitas sistem tenaga. Seri kompensasi kapasitif memberikan kompensasi impedans pada saluran yang menghasilkan kenaikan kapasitas transmisi daya pada jaringan, sehingga meningkatkan stabilitas sistem daya. SSSC (adalah kompensator seri berbasis *Voltage Source Converter (VSC)* yang menyediakan virtual kompensasi impedans saluran. Kemampuan SSSC dalam mengoperasikan mode kapasitif dan induktif membuatnya sangat efisien dalam mengendalikan daya aktif dan reaktif. Aplikasi SSSC dapat digunakan untuk stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan, kontrol aliran daya, dan osilasi sistem daya redaman.

Gbr. 3 memperlihatkan sistem dua mesin dasar dengan SSSC dan diagram fasor, dengan keterangan sebagai berikut.

- $V_1$  = besarnya tegangan mesin-1,
- $V_2$  = besarnya tegangan mesin-2,
- $\delta$  = perbedaan fase antara tegangan-tegangan ini,
- $I$  = arus yang mengalir dari mesin-1 ke mesin-2,
- $V_L$  = drop tegangan melintasi garis impedamnce,
- $P_q$  = daya aktif yang mengalir melalui saluran,
- $V_q$  = tegangan yang diinjeksikan oleh SSSC.



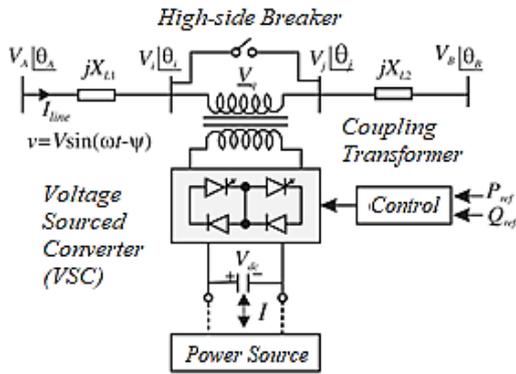
Gbr. 3 Sistem dua mesin dasar dengan SSSC dan diagram fasor [5].



Gbr. 5 Diagram Nyquist.

TABEL I  
PARAMETER GAIN CONSTANT DAN TIME CONSTANT

Parameter	Keterangan	Nilai
$K_A$	Amplifiers gain constant	1
$K_E$	Exciter gain constant	1
$K_G$	Generator gain constant	1
$K_R$	Sensor gain constant	1,5
$T_A$	Amplifiers time constant	0,1
$T_E$	Exciter time constant	1,2
$T_G$	Generator time constant	0,2
$T_R$	Sensor time constant	0,02



Gbr. 4 Diagram blok SSSC [5].

Tampak pada Gbr. 3 bahwa SSSC menginjeksikan tegangan kompensasi secara seri dengan saluran terlepas dari arus listrik. Ditransmisikan daya  $Pq$  dengan hubungan sudut transmisi  $\delta$ , sehingga menjadi fungsi parametrik dari tegangan yang diinjeksikan ( $V_q$ ).

SSSC adalah kompensator seri daya reaktif yang menggunakan konverter sumber tegangan secara seri dengan saluran transmisi, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 4. Mode operasi ini mengemulasi kompensasi reaktif seri terkontrol (mirip dengan yang diperoleh oleh kapasitor seri yang dikendalikan thyristor/TCSC), tetapi memberikan rentang kontrol yang lebih luas, karena dapat beroperasi secara bersamaan dalam mode kapasitif atau mode induktif. Pengontrol FACTS berbasis thyristor, seperti TCSC, didasarkan pada kontrol impedans, sehingga FACTS berbasis thyristor tergantung pada arus saluran. Sedangkan SSSC dapat beroperasi sebagai sumber tegangan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui sistem stabil atau tidak, dilakukan pemodelan tiga generator yang dipasang paralel pada beberapa bus. Selanjutnya, sistem disimulasikan dengan software ETAP 12.6 dan MATLAB. ETAP 12.6 digunakan untuk analisis pengaruh gangguan pada aliran daya dan pengaruh transien saat terjadi gangguan, sedangkan MATLAB digunakan untuk analisis pengaruh sebelum dipasang filter SSSC dan sesudah dipasang filter SSSC.

Seperti yang telah dijelaskan pada penelitian sebelumnya [3], diketahui bahwa respons osilasi memburuk, sehingga perlu dilakukan penambahan filter SSSC. Setelah dilakukan penambahan filter, pengaruh penambahan SSSC pada generator sinkron dianalisis.

A. Kriteria Kestabilan Nyquist

Metode yang diusulkan adalah perluasan dan peningkatan desain Nyquist konvensional. Hal ini dikarenakan desain berdasarkan Nyquist Plot (NP) konvensional telah dikenal dan digunakan di berbagai bidang teknik kontrol [7], [8].

Tujuan utamanya adalah untuk menilai stabilitas sistem dengan umpan balik berdasarkan respons frekuensi loop terbuka. Fungsi transfer loop tertutup (CLTF) dipilih untuk menyajikan hasil pertama (1). Beberapa modifikasi dilakukan untuk membuat pembangkit listrik. Fungsi transfer (1) hingga (3) disubstitusi ke dalam diagram blok pada Gbr. 4. Kemudian, persamaan dengan fungsi transfer diberikan dalam (4).

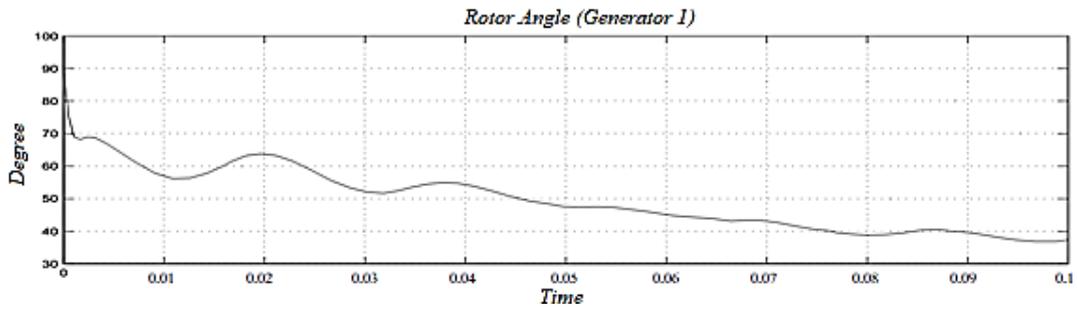
$$G_G(s)H_S(s) = \frac{K_A + K_E + K_G + K_R}{s(1 + \tau_A)(1 + \tau_E)(1 + \tau_G)(1 + \tau_R)} \quad (4)$$

Dengan menggunakan software MATLAB dan dengan memasukkan parameter yang ada pada Tabel I, diperoleh nilai phase margin dan gain margin sebagai berikut.

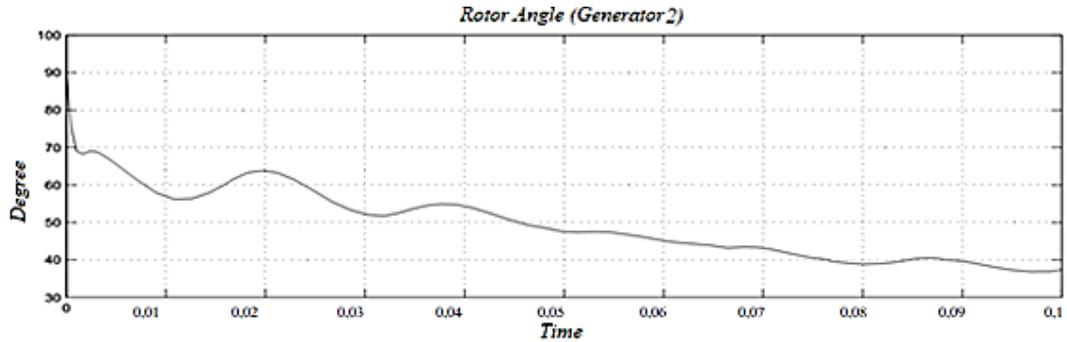
- Gain Margin = 0,8817
- GM frequency = 6,1472
- Phase Margin = -5,0666
- PM frequency = 6,5530
- Delay Margin = 0,94453
- DM frequency = 6,5530

Maka, dapat disimpulkan bahwa gain margin bernilai di bawah 6 dB dan phase margin memiliki nilai di bawah 30° tidak mencakup batasan yang menjadi range phase margin itu sendiri, sehingga sistem dapat dikatakan tidak stabil.

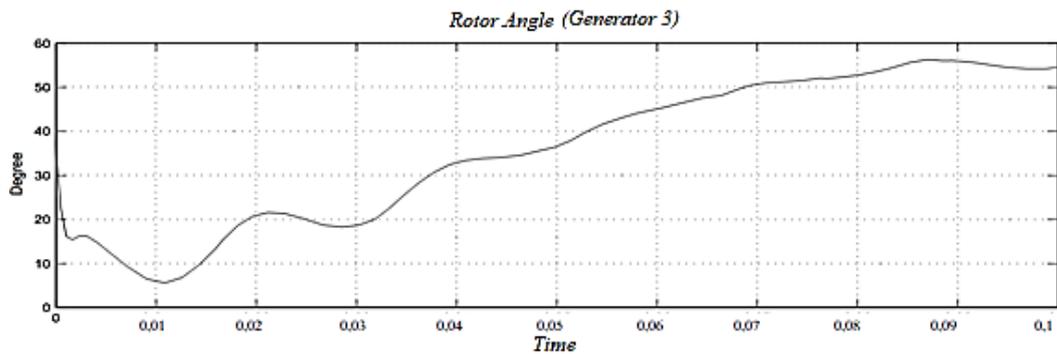
Tampak pada Gbr. 5 bahwa kurva  $G(j\omega)$  semakin menjauhi titik  $-1+j0$  tersebut, sehingga sistem dikatakan tidak stabil. Kedekatan kurva  $G(j\omega)$  ke titik  $-1+j0$  merupakan ukuran batas kestabilan: phase margin dan gain margin.



Gbr. 6 Respons sudut rotor (generator 1) pada kondisi gangguan (MATLAB).



Gbr. 7 Respons sudut rotor (generator 2) pada kondisi gangguan (MATLAB).



Gbr. 8 Respons sudut rotor (generator 3) pada kondisi gangguan (MATLAB).

TABEL II  
HASIL METODE LYAPUNOV

WAKTU (detik)	x1 (rad)	x2 (rad)	x3 (rad)	x4 (rad/dtk)	VL	VL <= Vcr
0	0	0	0	0	0	Stabil
0,1	1,3	2,7	25,9	70,1	25,0	Tidak stabil

Waktu pemutusan (detik) = 0,22

Pemodelan generator pada metode Nyquist diimplementasikan sebelum terjadi gangguan, sehingga dapat ditentukan terlebih dahulu, generator tersebut stabil atau tidak, ketika dihubungkan dengan sistem yang lebih besar [12]-[14].

**B. Metode Lyapunov sebagai Metode Pembanding**

Metode Lyapunov adalah metode lain yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem. Metode Lyapunov menggunakan matriks jaringan [7], [8]. Akan tetapi, penggunaan matriks jaringan pada penelitian ini menghasilkan matriks identitas dikarenakan gangguan yang terjadi pada sisi

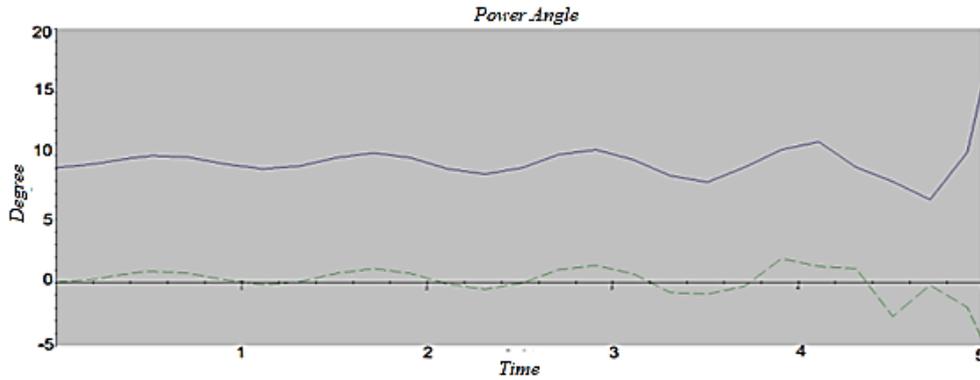
*main bus*. Artinya, fungsi Lyapunov yang dihasilkan tidak dapat diterapkan pada gangguan tersebut.

Metode Lyapunov dapat diterapkan pada suatu sistem jika gangguan terjadi pada bus selain *main bus*. Fungsi tersebut diimplementasikan untuk sistem setelah terjadi gangguan. Hasil dari metode Lyapunov ditunjukkan pada Tabel II.

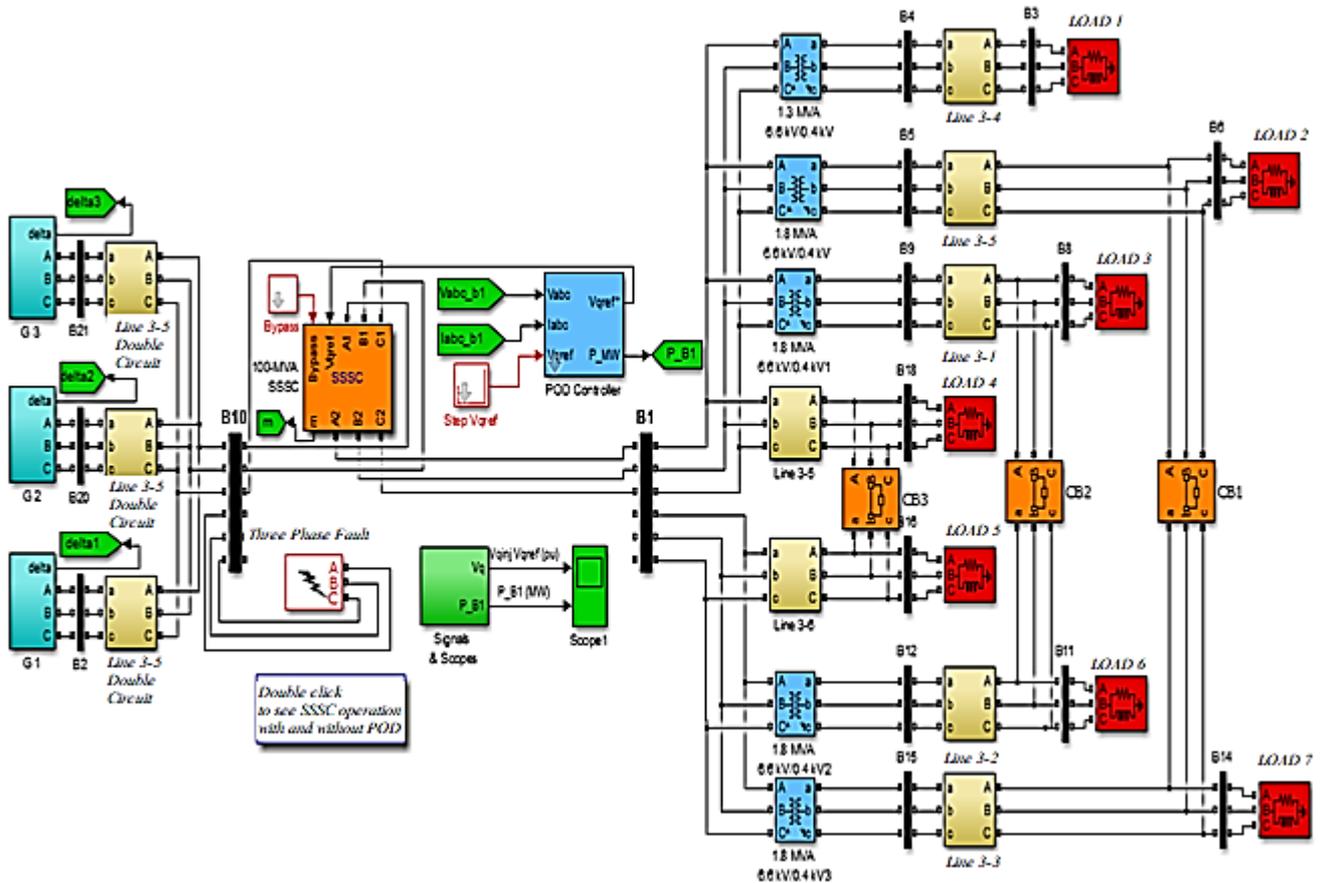
Berdasarkan Tabel II, dengan menggunakan metode Lyapunov dan waktu pemutusan 0,22 detik, dapat disimpulkan bahwa sistem mulai tidak stabil saat 0,1 detik, sedangkan menggunakan metode Nyquist, sistem tidak stabil sebelum 0,1 detik dikarenakan kestabilan sistem dapat diketahui sebelum gangguan.

**C. Kestabilan Transien**

Analisis kestabilan menggunakan metode Nyquist dapat dibuktikan menggunakan diagram Nyquist. Ketika sistem tidak stabil dan mengalami peningkatan osilasi, maka penambahan filter pada saluran sangat berguna untuk meningkatkan kestabilan sistem tenaga. Pengujian SSSC yang terletak pada



Gbr. 9 Respons sudut daya pada kondisi gangguan (ETAP).



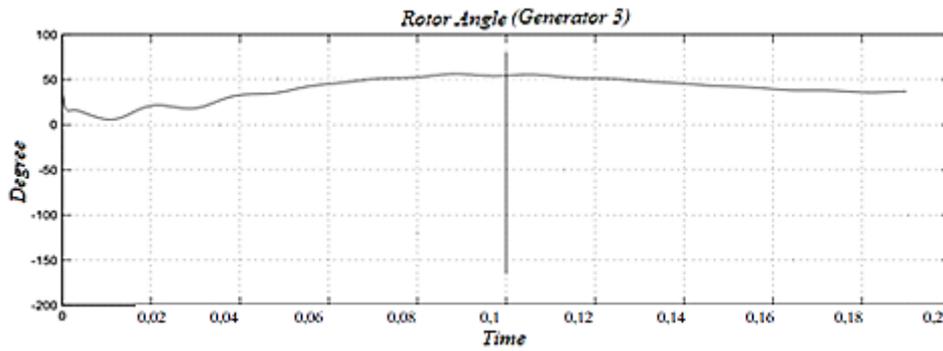
Gbr. 10 Simulasi setelah penambahan SSSC.

*main bus* diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang lebih baik. Peralatan FACTS jenis SSSC mempunyai respons yang sangat cepat untuk menstabilkan tegangan yang berlebih atau bus beban yang tidak memenuhi *range* standar PLN. Selain itu, SSSC tidak hanya mengompensasi daya reaktif, tetapi SSC juga dapat meredam osilasi akibat hilangnya sinkronisasi. Selain itu pula, SSSC juga dapat memasok daya reaktif dan daya nyata pada saluran transmisi, sehingga dapat mengoptimalkan kekurangan atau kelebihan daya reaktif dan mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi.

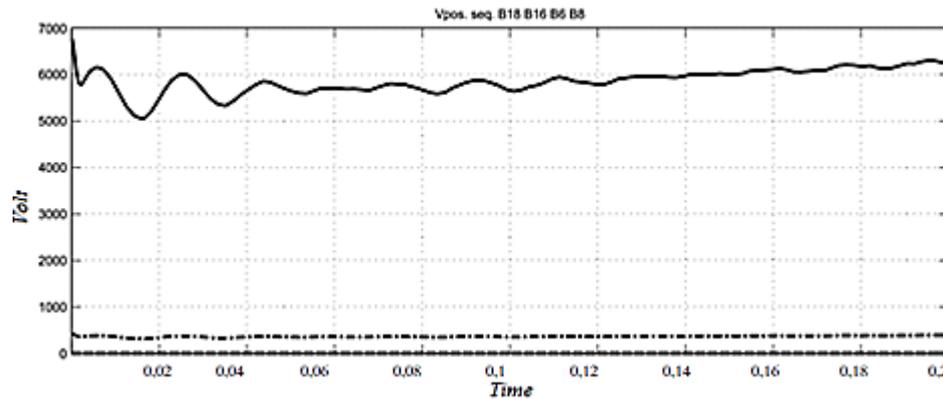
Untuk membuktikan bahwa gangguan tersebut juga disebabkan oleh kestabilan transien yang kurang memadai,

sehingga mengakibatkan sistem tidak kembali ke posisi normal atau *steady state*, maka simulasi dilakukan menggunakan *software* ETAP dan MATLAB.

Gbr. 6 sampai Gbr. 8 menunjukkan sudut rotor pada generator tidak dalam keadaan sinkronnya. Sedangkan Gbr. 9 menunjukkan bahwa sudut daya mengalami transien yang tidak dapat kembali ke posisi *steady state*-nya. Ketika sistem tidak stabil dan mengalami peningkatan osilasi, maka penambahan filter pada saluran sangat berguna untuk meningkatkan kestabilan sistem tenaga. Dengan pengujian



Gbr. 11 Respons sudut rotor setelah penambahan SSSC.



Gbr. 12 Respons tegangan sebelum penambahan SSSC.

TABEL III  
RESPONS SEBELUM PENAMBAHAN SSSC

	Tanpa SSSC	
	Essential	Non-essential
Tegangan bus	0,15	-
Daya nyata	0,13 dtk	0,05 dtk
Daya reaktif	-	-

TABEL IV  
RESPONS SETELAH PENAMBAHAN SSSC

	Dengan SSSC	
	Essential	Non-essential
Tegangan bus	0,05 dtk	0,05 dtk
Daya nyata	0,06 dtk	0,4 dtk
Daya reaktif	0,05 dtk	0,05 dtk

SSSC yang terletak di *main bus*, dapat diperoleh rekomendasi yang lebih baik.

Gbr. 10 menunjukkan bahwa penambahan filter SSSC terletak pada *main bus* dengan gangguan yang terletak di dekat generator dan respons setelah penambahan SSSC ditunjukkan pada Gbr. 11. Terlihat bahwa respons sudut rotor saat penambahan SSSC mengalami perbaikan mode osilasi. Sebelum 0,1 detik, osilasi tidak beraturan, sehingga ketiga generator tidak dapat sinkron satu sama lain. Akan tetapi, setelah 0,1 detik, osilasi mulai stabil pada sudut rotor sebesar 50°, sehingga dapat disimpulkan bahwa ketiga generator telah sinkron pada sistem.

Dengan pengujian SSSC, respons osilasi dapat dilihat dengan membandingkan dua kasus sebagai berikut.

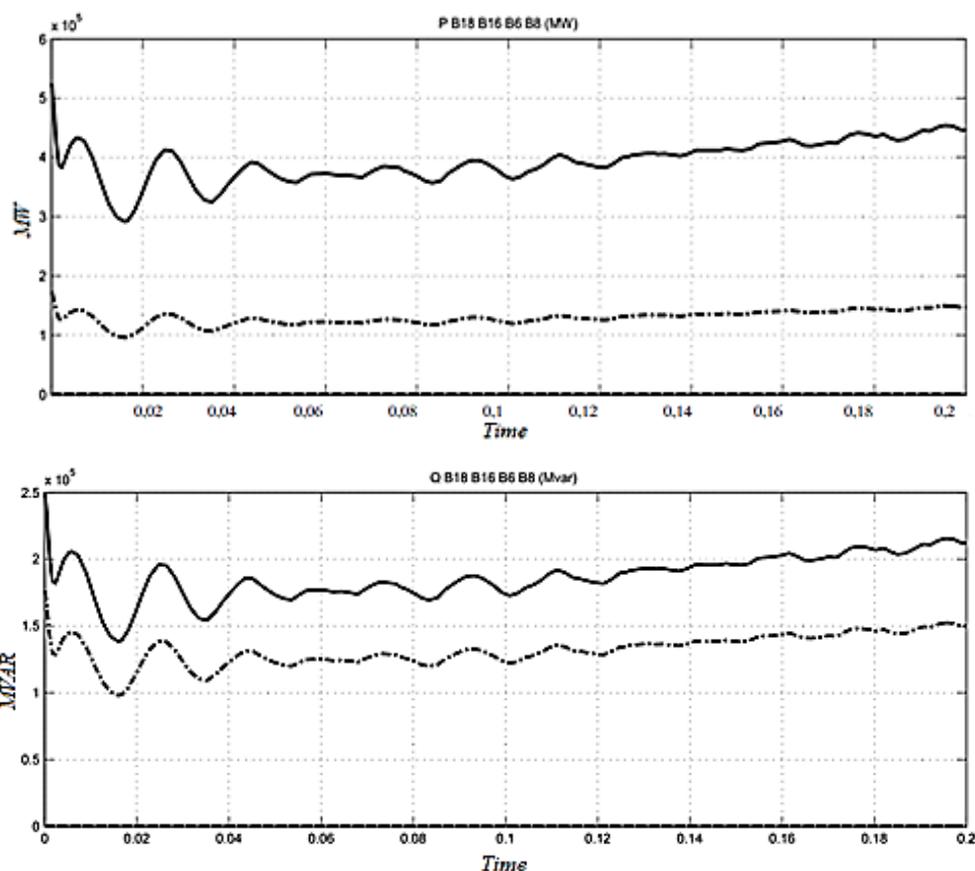
1) *Sebelum Penambahan SSSC*: Simulasi sebelum penambahan SSSC ditunjukkan respons tegangannya pada Gbr. 12 dan respons daya nyata serta daya reaktifnya ditunjukkan pada Gbr. 13. Perbandingan kedua respons tersebut disimpulkan pada Tabel II.

2) *Setelah Penambahan SSSC*: Simulasi setelah penambahan SSSC dapat dilihat respons tegangannya pada Gbr. 14 dan respons daya nyata serta daya reaktifnya pada Gbr. 15. Perbandingan kedua respons tersebut dapat disimpulkan pada Tabel III.

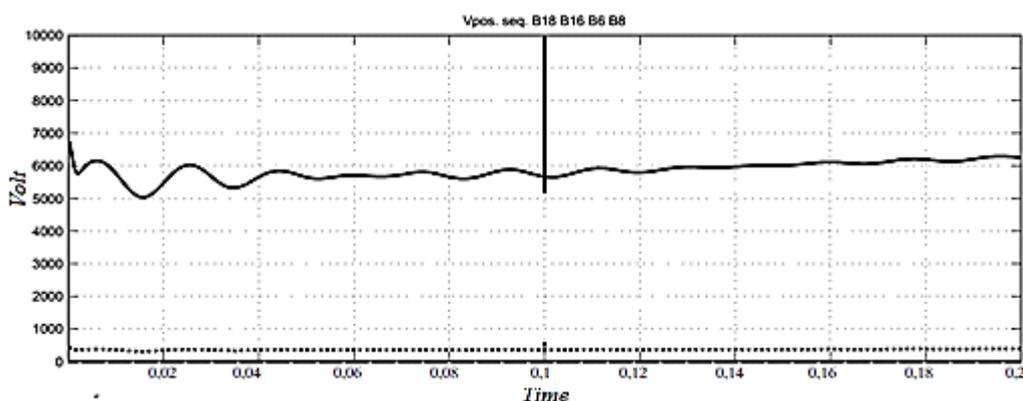
Setelah dilakukan uji coba menggunakan *software* MATLAB, berdasarkan Tabel III dan Tabel IV, diketahui bahwa pengaruh SSSC juga memberikan dampak pada osilasi tegangan bus dan daya nyata juga daya reaktif. Waktu yang dibutuhkan untuk berosilasi lebih sedikit dibanding sebelum penambahan filter SSSC. Osilasi pada tegangan bus memiliki waktu sebesar 0,15 detik sebelum penambahan SSSC. Akan tetapi, pengaruh penambahan SSSC tegangan bus memiliki waktu osilasi sebesar 0,05 detik.

#### IV. KESIMPULAN

Makalah ini membahas analisis ketahanan transien pada tiga buah generator yang dioperasikan paralel dengan metode Nyquist menggunakan *software* MATLAB dan ETAP 12.6.



Gbr. 13 Respons daya nyata dan daya reaktif sebelum penambahan SSSC.



Gbr. 14 Respons tegangan setelah penambahan SSSC.

Diagram Nyquist menyatakan bahwa kurva  $G(j\omega)$  menjauhi titik  $-1+j0$ , yang berarti sistem tidak stabil. Selain itu, dilihat dari nilai *gain margin* sebesar 1,3045 dB dan *phase margin* sebesar  $9,4647^\circ$ , dapat dikatakan bahwa sistem tidak stabil dan respons transien cenderung minimum. Untuk perbaikan kestabilan sistem, penambahan filter SSSC mempunyai respons yang sangat cepat. Generator yang hilang sinkronisasinya akan kembali pada posisi *steady state*-nya pada detik ke 0,12.

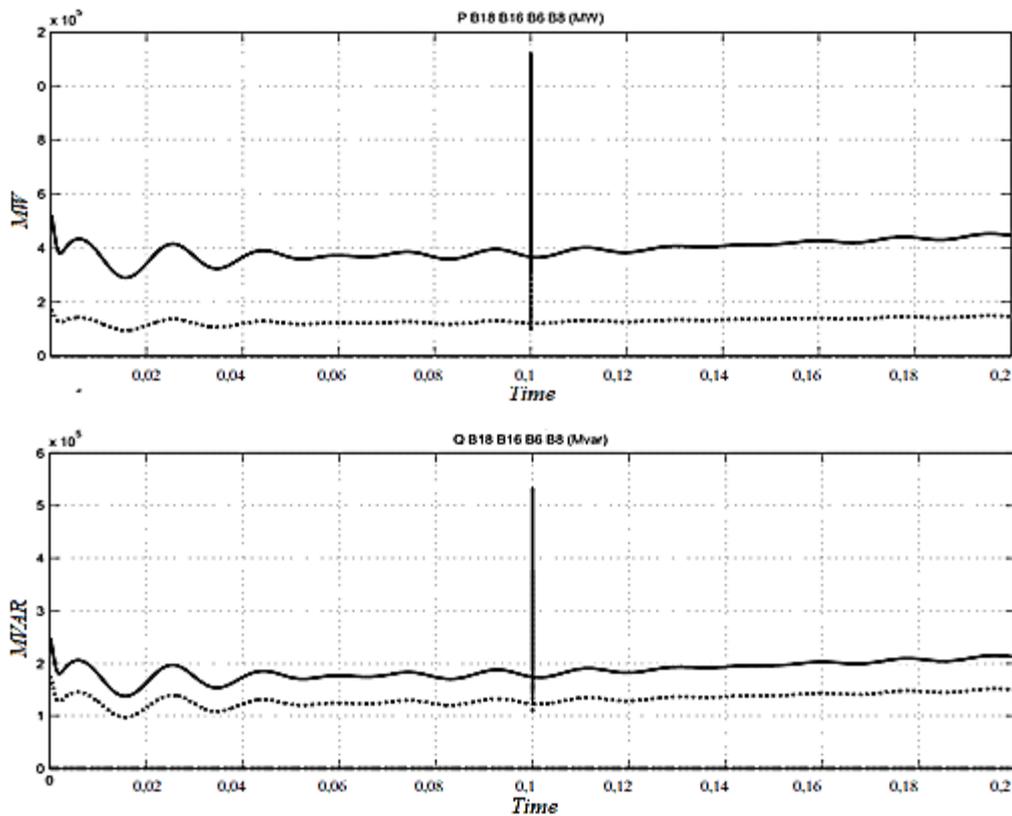
UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pertamina EP yang telah berkontribusi dalam penelitian studi kasus dan data

penelitian yang sangat bermanfaat bagi kelanjutan penelitian ini serta Politeknik Negeri Malang yang telah mendukung terselesainya penelitian ini, khususnya dengan penyediaan sarana di Laboratorium *Energy Conversion and Power System*.

REFERENSI

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Washington DC, USA: Mc Graw Hill, 1994.
- [2] J.J. Grainger, dan W.D. Stevenson, *Power System Analysis*, New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1988.
- [3] M.N. Hidayat, S. Izza, dan R.I. Putri, "Analysis of Transient Stability in Synchronous Generator Using Nyquist Method," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 7 No. 4.44, hal. 22-27, 2018.



Gbr. 15 Respons daya nyata dan daya reaktif setelah penambahan SSSC.

- [4] A.B. Patel, P.D. Raval, dan D. Patel, "Application of SSSC-Damping Controller for Power System Stability Enhancement," *ICRISET - Kalpa Publication in Engineering*, 2017, Vol. 1, hal. 123-133.
- [5] P.S.P. Kumar, N. Vijaysimha, dan C.B Saravana, "Static Synchronous Series Compensator for Series Compensation of EHV Transmission Line," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 2, No. 7, hal. 3180-3190, 2013.
- [6] K.D. Aswathi dan M.R. Sindhu, "Application of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) to Enhance Power Transfer Capability in IEEE Standard Transmission System," *International Journal of Control Theory and Applications (IJCTA)*, Vol. 8, No. 5, hal. 2029-2036, 2015.
- [7] Rosalina, "Analisis Kestabilan Peralihan Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Lyapunov," Tesis, Universitas Indonesia, Jakarta, Indonesia, 2010.
- [8] F. Supegina, "Dasar Sistem Kontrol," Pusat Pengembangan Bahan Ajar, Universitas Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, Vol 12, 2016.
- [9] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2010.
- [10] B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 7th ed., New York, USA: John Wiley & Sons, 1995
- [11] G. Rogers, *Power System Oscillations*, New York, USA: Springer US, 2000.
- [12] J. Zhou, Q. Zhang, dan H. Qian, "s-Domain Generalized Nyquist Criterion for Double Loop Sampled-Data Systems," *Proceeding of Chinese Automation Congress (CAC)*, 2015, hal. 139-144.
- [13] S. Gomes, C.H.C Guimarães, N. Martins, dan G.N. Taranto, "Damped Nyquist Plot for a pole Placement Design of Power System Stabilizers," *Electric Power System Research*, Vol.158, hal.158-169, 2018.
- [14] R. Atle, A. Mohammad, dan M. Marta, "Apparent Impedance Analysis: A New Method for Power System Stability Analysis," *Proceeding of 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2016, hal 1-7.