

Analisis Simulasi *Power System Stabilizers* (PSS) pada *Single Machine Damping System*

R. Jasa Kusumo Haryo
Politeknik Negeri Madiun
Madiun, Indonesia
e-mail: jasakusumo@pnm.ac.id

Sukanto
Politeknik Negeri Madiun
Madiun, Indonesia
e-mail: sukanto@pnm.ac.id

Abstrak — Untuk menyuplai kebutuhan energi listrik dibutuhkan kemampuan pada sistem pembangkit yang dapat diandalkan, hal ini berpengaruh pada kualitas daya listrik yang disalurkan kepada konsumen tersebut. Untuk memperoleh daya listrik yang berkualitas dibutuhkan pengaturan sistem pada sisi pembangkit yang efektif dan efisien. Maka dari itu perlu dilakukan pengaturan desain pada pembangkit yang dalam hal ini generator pembangkit sehingga didapatkan generator yang benar-benar baik dan dapat diandalkan kualitasnya. Untuk mendapatkan hasil terbaik, maka dilakukan simulasi pada sisi generator sebagai wujud perkembangan teknologi yang pada akhirnya dengan memanfaatkan perkembangan teknologi pada sistem tenaga listrik akan lebih mudah dalam mendesain dan memperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan.

Kata kunci— *simulasi, kualitas daya, generator, Power System Stabilizers* (PSS).

I. PENDAHULUAN

Generator pembangkit memiliki banyak komponen yang berpengaruh terhadap kualitas daya listrik yang dihasilkan. Pada Generator Sinkron ada 2 (dua) bagian pengontrol yang digunakan sebagai umpan balik untuk pengaturan generator, yaitu tegangan dan frekuensi.

Pada makalah ini akan dibahas pemodelan pada sistem eksitasi generator pembangkit menggunakan *Power System Stabilizers* (PSS) untuk menganalisis kestabilan sistem pembangkit tenaga listrik dari sisi pengaturan medan generator.

Penelitian ini membahas tentang simulasi *Power System Stabilizers* (PSS) pada generator sistem pembangkit tenaga listrik dalam menyuplai energi kepada konsumen. Simulasi dilakukan pada sistem tenaga listrik yang dapat meredam osilasi daya sehingga pada sistem pembangkit tidak dijumpai lagi adanya osilasi daya yang tentunya sangat berpengaruh terhadap kinerja pembangkit.

Untuk meredam osilasi daya pada sistem pembangkit, dalam penelitian ini akan dilakukan metode simulasi dengan software MATLAB pada sistem generator pembangkit yang dilengkapi PSS. Hasil dari penelitian ini adalah osilasi daya yang teredam dengan ditandai *settling time* yang cepat dan *overshoot* yang rendah sehingga akan diperoleh respon frekuensi pada pembangkit yang baik.

Tujuan dari sistem eksitasi pada generator adalah untuk mengontrol arus medan generator sinkron tersebut. Simulasi yang dilakukan menggunakan Matlab/Simulink untuk memodelkan sistem eksitasi generator menggunakan PSS.

II. METODOLOGI

A. Model Linear Sistem Tenaga Listrik

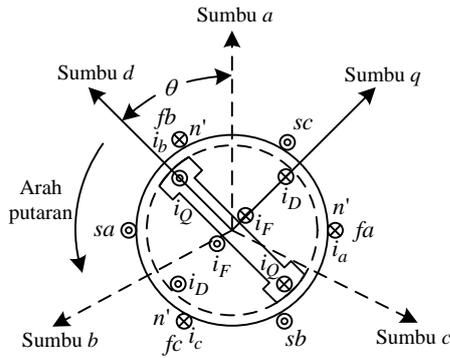
Model linear sistem tenaga listrik digunakan untuk menganalisis perilaku sistem akibat gangguan kecil, seperti perubahan beban yang kecil. Pada saat terjadi gangguan, sistem cenderung untuk menuju kondisi operasi yang baru. Selama terjadi perubahan dari kondisi awal ke kondisi operasi yang baru, sistem mengalami osilasi. Jika perubahan variabel *state* sistem sangat kecil (perubahan parameter x_i dari x_{i0} sampai $x_{i0} + \Delta x_i$, dengan Δx_i adalah perubahan dari parameter x_i yang kecil), maka sistem beroperasi di dekat daerah kondisi awal. Kondisi awal sistem dapat dianggap sebagai kondisi operasi awal yang tetap.

Untuk menguji perilaku sistem saat terjadi gangguan kecil, persamaan sistem dilinearisasi dengan kondisi awal yang tetap. Dengan cara linearisasi, persamaan linear dapat diperoleh dari persamaan sistem. Persamaan linear baru yang diperoleh, diasumsikan valid dalam daerah dekat kondisi awal yang tetap.

Sebagai contoh, diberikan perkalian $x_i x_j$. Variabel x_i dan x_j mempunyai kondisi awal x_{i0} dan x_{j0} yang dapat direpresentasikan sebagai nilai perubahan Δx_i dan Δx_j . Kondisi awal perkalian ini adalah $x_{i0} x_{j0}$.

B. Transformasi Park

Transformasi Park digunakan untuk menyederhanakan model matematik dari generator sinkron. Dalam transformasi tersebut, didefinisikan variabel baru yang diperoleh dari hasil proyeksi tiga variabel yang ada. Variabel baru itu adalah *d* (*direct axis*), *q* (*quadrature axis*), dan *stationary axis*. Transformasi dikembangkan secara matematik diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Representasi Mesin Sinkron

Dari Gambar 1 dapat diperoleh besaran-besaran dalam sumbu d, q yang diproyeksikan dari sumbu $a, b,$ dan c yang ada. Jika arus $i_a, i_b,$ dan i_c dinyatakan dalam koordinat $d, q,$ maka dapat diperoleh Persamaan sebagai berikut:

$$i_{sumbuq} = (2/3)[i_a \sin\theta + i_b \sin(\theta - 2\pi/3) + i_c \sin(\theta + 2\pi/3)]$$

$$i_{sumbud} = (2/3)[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 2\pi/3) + i_c \cos(\theta + 2\pi/3)]$$

Dalam transformasi ini, sumbu a dijadikan sebagai sumbu referensi. Pengaruh Transformasi Park adalah perubahan semua besaran stator dalam fase a, b, c ke dalam besaran baru yang bergerak bersama rotor. Jika terdapat tiga variabel i_a, i_b, i_c maka diperlukan tiga variabel baru. Transformasi Park menggunakan dua variabel baru dalam sumbu d, q dan satu variabel lagi berupa arus stasioner yang sebanding dengan arus urutan nol. Bentuk matematik dari Transformasi Park adalah sebagai berikut,

$$i_{odq} = P i_{abc}$$

dengan,

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix},$$

$$i_{odq} = \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \text{ dan } i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Transformasi di atas juga berlaku untuk besaran tegangan dan fluks bocor. Transformasi tersebut digunakan untuk memodelkan generator yang akan disimulasikan dalam penelitian ini.

C. Model Linear Generator Sinkron

Dalam penelitian ini disimulasikan model linear generator sinkron karena model generator yang ada masih dalam bentuk nonlinear. Model generator harus dilinearisasi sehingga menjadi model linear generator. Model generator sinkron terdiri

dari beberapa persamaan yang membentuk suatu model generator.

Persamaan tegangan sumbu d dalam p.u sebagai berikut,

$$v_d = -r i_d - \omega L_q i_q - k \omega M_Q i_Q - \frac{L_d}{\omega_R} \dot{i}_d - k \frac{M_F}{\omega_R} \dot{i}_F - \frac{M_D}{\omega_R} \dot{i}_D$$

Persamaan tersebut dapat dilinearisasi dengan proses sebagai berikut,

$$(v_{d0} + \Delta v_d) = -r(i_{d0} + \Delta i_d) - (\omega_0 + \Delta\omega)L_q(i_{q0} + \Delta i_q) - k(\omega_0 + \Delta\omega)M_Q(i_{Q0} + \Delta i_Q) - \frac{L_d}{\omega_R}(\dot{i}_{d0} + \Delta \dot{i}_d) - k \frac{M_F}{\omega_R}(\dot{i}_{F0} + \Delta \dot{i}_F) - \frac{M_D}{\omega_R}(\dot{i}_{D0} + \Delta \dot{i}_D)$$

Dengan menguraikan Persamaan di atas, maka didapat Persamaan sebagai berikut.

$$(v_{d0} + \Delta v_d) = (-r i_{d0} - \omega_0 L_q i_{q0} - k \omega_0 M_Q i_{Q0} - L_d \dot{i}_{d0} - k M_F \dot{i}_{F0} - k M_D \dot{i}_{D0}) - r \Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - i_{q0} L_q \Delta \omega - \omega_0 k M_Q \Delta i_Q - i_{Q0} k M_Q \Delta \omega - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D$$

Pada Persamaan di atas, nilai v_{d0} sama dengan nilai suku di dalam kurung di sisi kanan. Sehingga persamaan perubahan v_d dapat dituliskan menjadi Persamaan berikut.

$$\Delta v_d = -r \Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - \omega_0 k M_Q \Delta i_Q - (i_{q0} L_q + i_{Q0} k M_Q) \Delta \omega - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D$$

Jika $\lambda_{q0} = (i_{q0} L_q + i_{Q0} k M_Q)$, maka Persamaan di atas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta v_d = -r \Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - \omega_0 k M_Q \Delta i_Q - \lambda_{q0} \Delta \omega - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D$$

Dengan cara yang sama, persamaan perubahan tegangan pada sumbu q dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta v_q = \omega_0 L_d \Delta i_d + \omega_0 k M_F \Delta i_F + \omega_0 k M_D \Delta i_D + (i_{d0} L_d + i_{F0} k M_F + i_{D0} k M_D) \Delta \omega - r \Delta i_q - L_q \Delta \dot{i}_q - k M_Q \Delta \dot{i}_Q$$

Jika $\lambda_{d0} = (i_{d0} L_d + i_{F0} k M_F + i_{D0} k M_D)$, maka Persamaan di atas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta v_q = \omega_0 L_d \Delta i_d + \omega_0 k M_F \Delta i_F + \omega_0 k M_D \Delta i_D + \lambda_{d0} \Delta \omega - r \Delta i_q - L_q \Delta \dot{i}_q - k M_Q \Delta \dot{i}_Q$$

Persamaan kumparan medan dari generator sinkron dalam bentuk linear ditunjukkan pada Persamaan di bawah ini

$$-\Delta v_F = -r_F \Delta i_F - kM_F \Delta i_d - L_F \Delta i_F - M_R \Delta i_D$$

Persamaan kumparan peredam yang telah dilinearisasi terdapat pada Persamaan di bawah ini.

$$0 = -r_D \Delta i_D - kM_D \Delta i_d - M_R \Delta i_F - L_D \Delta i_D$$

$$0 = -r_Q \Delta i_Q - kM_Q \Delta i_q - L_Q \Delta i_Q$$

Persamaan linear torsi dituliskan pada Persamaan berikut ini.

$$\tau_j \Delta \dot{\omega} = \Delta T_m - \frac{1}{3} [(L_d i_{q0} - \lambda_{q0}) \Delta i_d - (\lambda_{d0} - L_q i_{d0}) \Delta i_q - kM_F i_{q0} \Delta i_F - kM_D i_{q0} \Delta i_D + kM_Q i_{d0} \Delta i_Q] - D \Delta \omega$$

Persamaan di atas dapat diubah ke dalam bentuk Persamaan sebagai berikut.

$$\Delta T_m = \frac{(L_d i_{q0} - \lambda_{q0})}{3} \Delta i_d - \frac{(\lambda_{d0} - L_q i_{d0})}{3} \Delta i_q - \frac{kM_F i_{q0}}{3} \Delta i_F - \frac{kM_D i_{q0}}{3} \Delta i_D + \frac{kM_Q i_{d0}}{3} \Delta i_Q + D \Delta \omega + \tau_j \Delta \dot{\omega}$$

Persamaan perubahan sudut rotor generator diberikan pada Persamaan: $0 = \Delta \omega - \Delta \dot{\delta}$

Persamaan -persamaan di atas merupakan persamaan linear generator sinkron tanpa beban. Persamaan linear generator tersebut dapat dituliskan ke dalam model matriks keadaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta v_d \\ -\Delta v_F \\ 0 \\ \Delta v_q \\ 0 \\ \Delta T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega_0 L_q \\ 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_F & -\omega_0 kM_D & r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{q0} - L_d i_{q0} & -kM_F i_{q0} & -kM_D i_{q0} & -kM_Q i_{d0} \\ \frac{3}{3} & \frac{3}{3} & \frac{3}{3} & \frac{3}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_0 kM_Q & \lambda_{q0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_{d0} & 0 \\ r_Q & 0 & 0 \\ \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (2.13)L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

atau dalam bentuk Persamaan (2.14) $v = -Kx - M\dot{x}$ (2.15)

Persamaan tersebut dapat diubah ke dalam bentuk umum persamaan matriks keadaan $\dot{x} = Ax + Bu$, sebagai berikut:

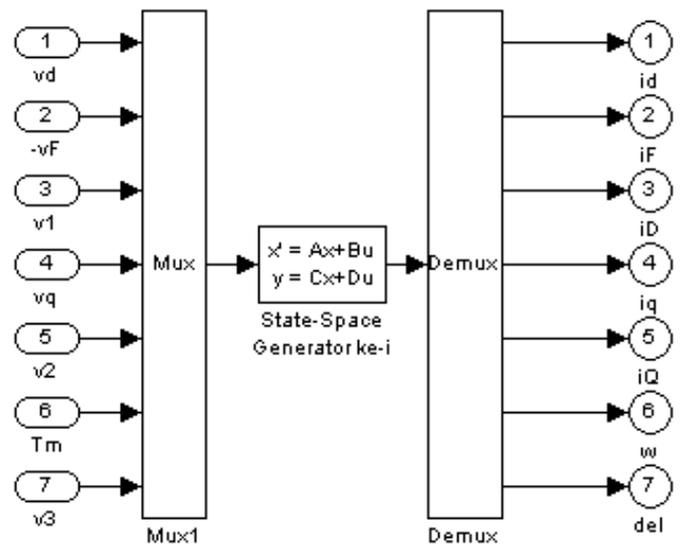
$$v = -Kx - M\dot{x}$$

$$M\dot{x} = -Kx - v$$

$$\dot{x} = -M^{-1}Kx - M^{-1}v$$

dengan $A = -M^{-1}K$, $B = -M^{-1}$

Model generator dapat disimulasikan dengan beberapa cara. Pada penelitian ini, blok diagram model linear generator disimulasikan dalam bentuk Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Simulink Model Linear Generator

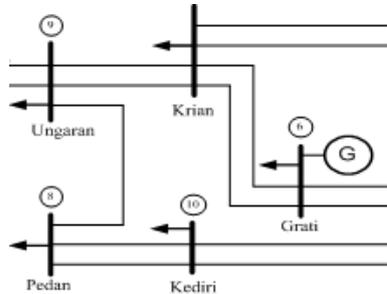
Matrik A, B, C, D dari generator sinkron ditulis dalam m-file, dan nilainya di-load dengan menggunakan block function state-space yang terdapat pada simulink.

D. Plant Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik yang disimulasikan ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem tenaga listrik digunakan sebagai plant dalam simulasi. Sistem tenaga listrik terdiri dari 1 buah pembangkit dengan jumlah bus total sebanyak 5 bus.

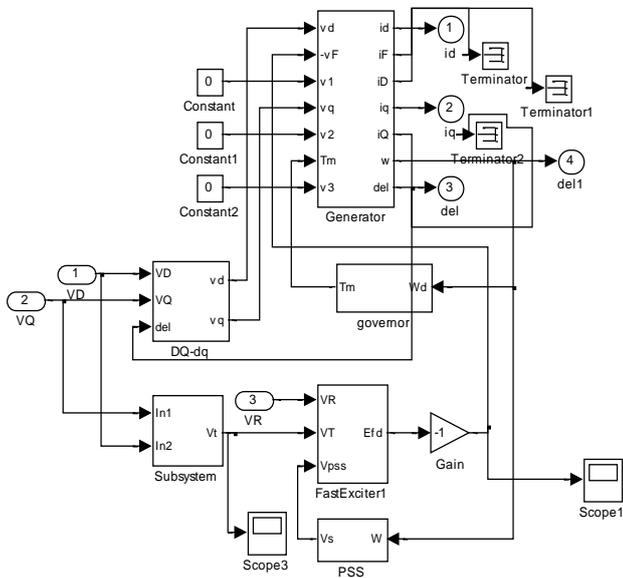
Parameter dinamik mesin, data beban dan pembangkitan serta data saluran transmisi digunakan untuk perhitungan reduksi admitansi jaring dan parameter model linear *single machine*.

PSS dipasang pada sisi generator. PSS menggunakan penyimpangan kecepatan rotor generator sebagai sinyal input. Output PSS merupakan tegangan yang diumpangkan pada sistem eksitasi.



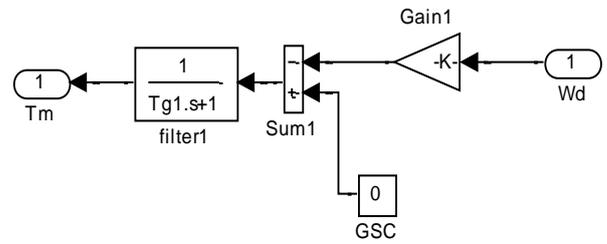
Gambar 3. Sistem Tenaga Listrik

Pemodelan PSS pada generator sistem pembangkit ditunjukkan pada Gambar 4.



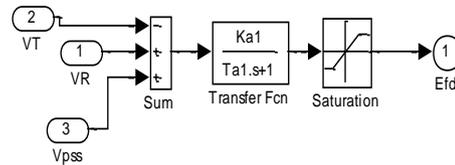
Gambar 4. Model Generator dalam Simulink

Adapun governor yang dipakai pada simulasi ini menggunakan model seperti pada Gambar 5.



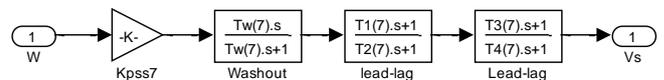
Gambar 5. Model Governor dalam Simulink

Fast exciter yang digunakan adalah model *fast exciter* pada Gambar 6.



Gambar 6. Model Fast Exciter dalam Simulink

Power System Stabilizers (PSS) berfungsi untuk meredam osilasi frekuensi pada sistem pembangkit yang disebabkan oleh adanya perubahan beban yang fluktuatif. PSS merupakan peralatan yang menghasilkan sinyal kontrol untuk diumpangkan pada sistem eksitasi. Fungsi dasar PSS adalah menambah batas kestabilan dengan mengatur eksitasi generator untuk memberi redaman terhadap osilasi rotor mesin sinkron. Komponen PSS tampak pada gambar 7.



Gambar 7. Komponen PSS

III. HASIL DAN ANALISIS

Simulasi pada sistem yang dilakukan membandingkan *overshoot* dan *settling time* antara sistem tanpa kontrol dan sistem yang dilengkapi dengan PSS. Pengamatan dilakukan pada 1 buah pembangkit sistem interkoneksi jaringan tenaga listrik.

A. Parameter Dinamik Mesin pada Pembangkit

Data simulasi yang digunakan adalah sistem tenaga listrik sebagai plant dalam simulasi. Sistem tenaga listrik yang disimulasikan adalah jaring tenaga listrik yang terdiri dari 1 buah pembangkit dengan jumlah bus total sebanyak 5 bus.

Untuk mengerjakan penelitian ini, diperlukan data-data parameter dinamik mesin. Data-data tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut,

Tabel 1 Parameter Dinamik Mesin

Pembangkit	X'_d (pu)	X''_d (pu)	X'''_d (pu)	X_q (pu)	X'_q (pu)	X''_q (pu)	H (det)	K_g (pu)	T_g (det)	K_A (pu)	T_A (det)	T_{do} (det)
Grati	1.7	0.25	0.19	1.64	0.38	0.19	3.5	20	1	100	0.04	5.9

B. Beban dan Pembangkitan

Sebelum melakukan simulasi lebih lanjut, diperlukan data beban dan pembangkitan yang dapat diperoleh dengan melakukan simulasi menggunakan software MATLAB. Hasil dari simulasi ini mendapatkan hasil berupa Daya Aktif dan Daya Reaktif pada pembangkitan dan konsumsi daya. Data-data tersebut ditunjukkan dalam Tabel 2 berikut,

Tabel 2. Data Beban dan Pembangkitan

No	Bus	Jenis	Pembangkitan		Konsumsi	
			P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	Grati	Generator	442.00	212.63	104.0	15.0
2	Pedan	Beban	-	-	424.0	219.0
3	Ungaran	Beban	-	-	213.0	284.0
4	Kediri	Beban	-	-	401.0	230.0
5	Surabaya Barat (Krian)	Beban	-	-	787.0	58.0

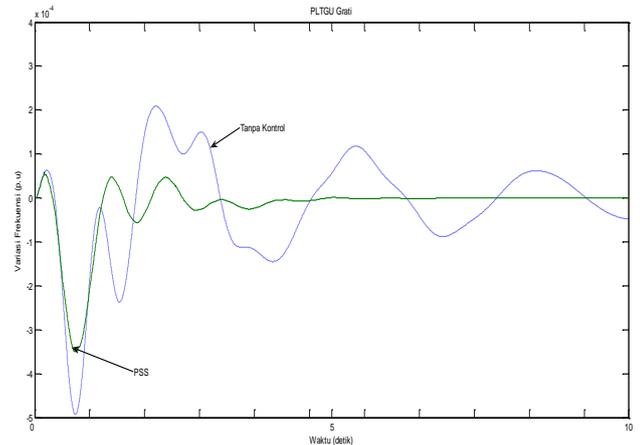
C. Saluran Transmisi

Untuk melakukan simulasi berikutnya, diperlukan data beban saluran transmisi. Hasil simulasi pada saluran transmisi tampak pada Tabel 3 berikut,

Tabel 3. Beban Saluran Transmisi

No.	Saluran	$R + j X$ (pu)	Jarak(Km)
1	Ungaran-krian	0.0147 + j 0.1413	251.00
2	Ungaran-Pedan	0.0088 + j 0.0836	75.00
3	Krian-Grati	0.0103 + j 0.1151	74.00
4	Pedan-Kediri	0.0206 + j 0.2303	202.78

Respon variasi frekuensi pada PLTGU Grati terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon variasi frekuensi PLTGU Grati

IV. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi pemasangan PSS pada pembangkit untuk meredam osilasi pada sistem jaringan tenaga listrik dapat disimpulkan sebagai berikut,

1. Pemasangan PSS pada pembangkit dapat meredam osilasi pada sistem jaringan listrik.
2. Sistem yang dilengkapi PSS dapat menekan overshoot respon variasi frekuensi pada pembangkit dari -5.10^{-4} p.u. menjadi $-3,4.10^{-4}$ p.u.
3. Sistem yang dilengkapi PSS dapat mempercepat settling time respon variasi frekuensi menjadi 5 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics : Stability and Control", John Wiley and Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore and Interline Publishing Pvt Ltd, Bangalore, India, 1996.
- [2] D. P. Kothari, I. J. Nagrath, "Modern Power System Analysis", McGraw-Hill Education (Asia), Singapore, 2004.
- [3] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Eletrial Engineering Series, Singapore, 1999.
- [4] P.M. Anderson & A.A. Fouad, "Power system control and stability", The Iowa State University Press, 1977.
- [5] M.A. Pai, "Power System Stability", North Holland Publishing Company, 1931.
- [6] Kundur P, "Power system stability and control", NewYork: McGraw-Hill, 1994.
- [7] Qian Liu, "Damping controller design for FACTS devices in power systems using novel control techniques", Iowa State University, Iowa, 2006.
- [8] Imam Robandi, "Desain Sistem Tenaga Modern: Optimisasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika. Andi Offset, 2006
- [9] Hendrik Maryono, "Koordinasi Power System(PSS) dan Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC) Damping Controller Menggunakan AIS Via Clonal Selection, Proceeding of The 7th Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (SITIA) Surabaya-Indonesia, May 2nd, 2006.