

PERBAIKAN STABILITAS DINAMIS SISTEM 500 KV JAWA-BALI MENGUNAKAN UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)

Agus Junaidi^[1], Adi Soeprijanto^[2], Imam Robandi^[3]

^[1] Teknik Elektro Institut Teknologi Medan

Email.: 4n01mhabib@yahoo.com

^{[2],[3]} Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember

ABSTRACT

Recently, due to the progress of power electronics technology, a Flexible AC Transmission System (FACTS) has been used as an control device to improve the dynamic stability of a power sytem. One type of FACTS devices is Unified power Flow Controller (UPFC).

This research investigate the great impact of UPFC to damp oscillation power system with injection model to the transmission line. The injection models is created in an equation active and reactive power supply of the UPFC.

Package program is MATLAB used to excute the simulation the UPFC injection model to the damp electromechanical oscillation. Examination was done by case study at an 500 KV Jawa-Bali electrical power system. Examination result show that UPFC installation can improve electric power system dynamic stability seen by the overshoot and settling time decrease.

Key Word: Power System Dynamics Stability, UPFC, Injection Model

PENDAHULUAN

Stabilitas sistem tenaga lisitrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle*

Stability) dan kestabilan tegangan (*Voltage Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor di klasifikasikan menjadi *Small Signal Stability* dan *Transient Stability*.

Perbaikan Stabilitas dinamis dapat dilakukan dengan pemasangan *Unified Power Flow Controller (UPFC)*. Pengembangan konsep UPFC sebagai piranti FACTS dalam meningkatkan keandalan pengoperasian, pengontrolan dan perbaikan stabilitas sistem tenaga [1]-[4], dimana UPFC sebagai piranti *Flexible AC Transmission System (FACTS)* mampu memberikan fungsi-fungsi regulasi tegangan, pergeseran fasa, kompensasi seri serta kompensasi *shunt* yang dapat dilakukan secara simultan dan *real-time*.

Penelitian yang dilakukan oleh A. abavi-Niaki dan MR. Iravani [5] mengembangkan pemodelan matematis UPFC untuk studi Keadaan *Steady-State* dan *Transient*. Penentuan lokasi UPFC sebagai strategi kendali didiskusikan pada penelitian tersebut. Akurasi dari pemodelan diperoleh secara terperinci menggunakan simulasi *Electromagnetic Transient Program (EMTP)*

Penelitian yang dilakukan oleh A.M Kulkarni dan K.R Padiyar [6], UPFC tidak hanya memiliki kemampuan mengendalikan aliran daya, tetapi dapat memperbaiki stabilitas sistem tenaga listrik dengan menjaga nilai Torsi Serempak (T_s) dan Torsi Peredam (T_d) bernilai positif. Berdasarkan persamaan osilasi rotor sinyal kecil, untuk meredam osilasi perlu ditambahkan torsi peredam dan untuk memperbaiki stabilitas perlu ditambahkan torsi serempak, hasilnya memperlihatkan tanpa pemasangan UPFC simpangan sudut rotor semakin besar sedangkan dengan pemasangan UPFC diperoleh redaman yang baik.

Berdasarkan permasalahan penggunaan UPFC untuk meredaman osilasi sistem tenaga listrik, maka tujuan dari penelitian ini adalah bagaimana desain model injeksi UPFC yang diterapkan pada sistem transmisi dapat meredam osilasi elektromekanik berupa perubahan kecepatan rotor dan sudut rotor sehingga akan memperbaiki kinerja sistem tenaga listrik dalam hal ini unjuk kerja (*Performance*) kestabilannya.

Stabilitas Dinamis

Stabilitas dinamis merupakan kemampuan dari seluruh mesin dalam sistem untuk menyesuaikan pada perubahan beban yang kecil atau benturan (*impact*). Perubahan

kecil pada sisi beban akan menyebabkan perubahan kecepatan sudut pada rotor dan tegangan terminal generator setelah mengalami gangguan. Adanya ketidakseimbangan antara sisi pembangkit dengan sisi beban perlu mendapatkan perhatian dengan adanya kemungkinan muncul gejala dinamik pada sistem tenaga listrik.

Gejala dinamik berupa osilasi, jika sistem stabil maka osilasi tersebut akan teredam dan generator akan kembali kepada kondisi operasi yang stabil, yakni ditandai dengan kecepatan rotor yang kembali ke kecepatan sinkron. Pemodelan sistem menggunakan model linier karena perubahan beban pada kestabilan dinamik kecil. Kestabilan Dinamik sistem tenaga listrik dapat dianalisis melalui *nilai eigen* ataupun mengamati unjuk kerja melalui respon karakteristik sistem.

Nilai eigen suatu matriks adalah nilai besaran skalar dengan parameter λ yang memenuhi persamaan:

$$A\phi = \lambda\phi \quad (1)$$

A merupakan matriks $n \times n$, ϕ merupakan vector $n \times 1$, $\phi \neq 0$, untuk menentukan Nilai eigen maka persamaan (1) dapat ditulis sebagai berikut;

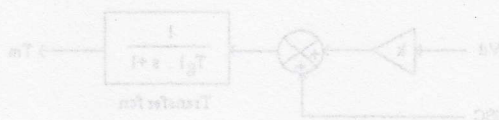
$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2)$$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3)$$

pengembangan determinan pada persamaan karakteristik (2) dan (3) akan didapatkan Nilai $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ yang menjadi nilai eigen (eigen value) dari matriks A.

Komponen real *eigen value* menghasilkan redaman dan komponen imajiner menghasilkan frekwensi osilasi. Bila bagian realnya negatif menunjukkan osilasi teredam, jika realnya positif osilasi tidak teredam. Untuk pasangan kompleks eigen value:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (4)$$



Sistem Tenaga listrik

Model Generator

Persamaan variable keadaan mesin sinkron dituliskan dalam bentuk persamaan matrik diberikan pada persamaan matriks *State Space* [10]

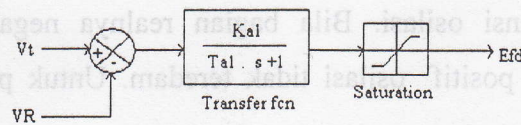
$$\begin{bmatrix} \dot{v}_d \\ \dot{v}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega_0 L_f & \omega_0 kM_a & \lambda_{\infty} & 0 & 0 \\ 0 & r_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_f & -\omega_0 kM_o & r & 0 & -\lambda_{\infty} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_o & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{\infty} - L_d i_{\infty}}{3} & \frac{-kM_f i_{\infty}}{3} & \frac{-kM_o i_{\infty}}{3} & \frac{\lambda_{\infty} + L_d i_{\infty}}{3} & \frac{-kM_a i_{\infty}}{3} & -D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_o \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_d & kM_f & kM_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_f & L_f & M_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_o & M_a & L_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_f & kM_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_o & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_o \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix}$$

Pemodelan Eksitasi

Jenis exiter yang dipergunakan adalah jenis *fast exiter*. K_A merupakan penguatan tegangan yang linier dengan waktu konsta τ_a . Persamaan sistem eksitasi ditulis sebagai berikut :

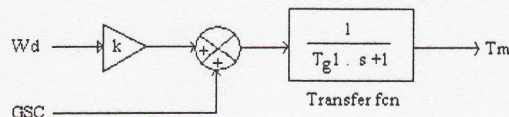
$$E_{fd} = K_A (V_T - V_R) / (1 + \tau_a s)$$



Gambar 1. Sistem eksitasi

Governor

Blok diagram governor secara umum ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. Governor

Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa perubahan kecepatan omega (ω) atau *Speed Reference Changer* (GSC) menghasilkan sebuah perubahan torsi mekanik mesin T_m . Perubahan yang terjadi pada T_m tergantung pada jatuh kecepatan (*speed droop*), *transfer function* governor dan sumber energi. Untuk memodelkan diasumsikan nilai GSC adalah nol ($GSC=0$) dan efek penggabungan sistem turbin dan speed governor akan merubah daya mekanik (P_m) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_m = -[K_g / (1 + \tau_g s)] \omega \quad (5)$$

Dengan,

K_g = konstanta gain

τ_g = Governor time konstan

Saluran Transmisi dan Beban

Pemodelan beban akan dipresentasikan sebagai impedansi konstan walau pada kenyataan beban sistem tenaga listrik dinamis, hal ini dilakukan untuk membantu kemudahan pemodelan sistem. Daya yang diserap oleh beban dikonversikan ke dalam bentuk impedansi seri atau paralel. Representasi ini biasanya digunakan pada studi stabilitas sistem tenaga listrik. Jika daya (MW dan MVAR) dari suatu beban diketahui maka impedansi dapat dihitung dengan:

$$Z = \frac{V^2}{I} = \frac{V^2}{P - jQ}$$

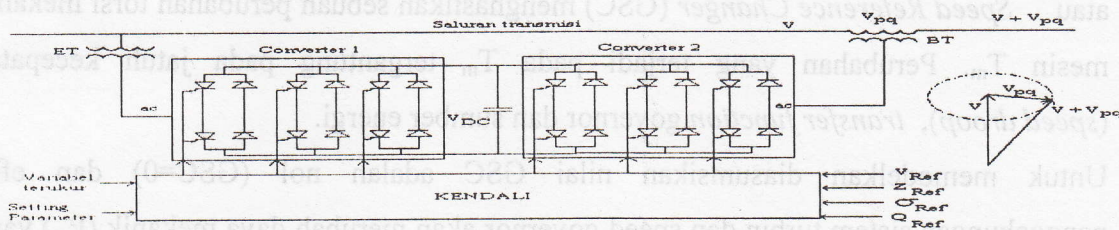
atau

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{P - jQ}{V^2} \quad (6)$$

Dalam sistem tenaga listrik beban akan dimasukkan kedalam jaringan melalui dengan mereduksi bus yang tidak memiliki generator.

Unified Power Flow Controller (UPFC)

UPFC merupakan Piranti *Flexible AC Transmission System* terdiri dari dua buah konverter yang terhubung dengan transformator seri dan paralel kesaluran transmisi



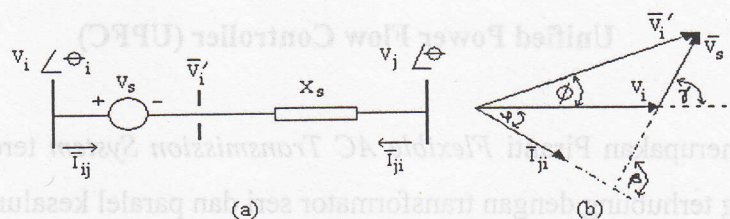
Gambar 3. Unified power Flow Controller dengan dua voltage source converter

Pada Gambar 3 konverter 2 sebagai fungsi utama UPFC menginjeksikan tegangan V_{pq} dengan magnetude V_{pq} dan sudut fasa dapat dikendalikan seri dengan saluran transmisi melalui *boosting transformer*. Tegangan yang diinjeksikan ini berperan sebagai sumber tegangan ac sinkron (*Synchronous ac voltage source*). Arus saluran transmisi mengalir melalui sumber tegangan ini mengalami perubahan daya aktif dan reaktif. Di antara konverter 2 dan sistem ac. Daya reaktif yang diubah pada terminal ac diubah ke daya dc pada kapasitor dc sebagai permintaan daya aktif.

Fungsi utama konverter-1 adalah untuk memberikan atau menyerap daya aktif yang diminta oleh konverter-2 pada rangkaian dc bersama. Daya rangkaian dc dikonversi kembali ke bolak-balik dan dikopel ke saluran transmisi melalui *Boosting Transformer*, konverter-1 dapat juga menyerap daya reaktif yang dapat dikendalikan, jika ini diinginkan maka akan memberikan kompensasi reaktif shunt secara bebas untuk saluran transmisi.

Model Injeksi UPFC

Pengaruh UPFC pada sistem tenaga diawali dengan analisis model injeksi tegangan (*series Voltage Source Converter*) disingkat dengan *VSC* sebagai fungsi utama. Rangkaian ekuivalen model injeksi UPFC ditunjukkan pada gambar 4a dengan vektor diagram dari rangkaian ekuivalen *VSC* diberikan pada gambar 4b.



Gambar (4a) Representasi dari *VSC* hubungan seri, (4b). Vektor Diagram rangkaian ekuivalen *VSC*

Sumber tegangan terhubung seri ditempatkan antara bus- i dan bus- j pada sistem tenaga. Konverter sumber tegangan seri dapat dimodelkan dengan tegangan seri ideal \bar{V}_s terhubung seri dengan reaktansi X_s . pada Gambar 4a tersebut melukiskan tegangan ideal \bar{V}_s dan sumber tegangan khayal \bar{V}_s' dibelakang reaktansi membentuk persamaan tegangan sebagai berikut [14]:

$$\bar{V}_s' = \bar{V}_s + \bar{V}_i \quad (7)$$

Sumber tegangan seri \bar{V}_s dapat dikendalikan magnitude dan sudut fasanya:

$$\bar{V}_s = r \bar{V}_i e^{j\gamma} \quad (8)$$

Batasan r sebagai ratio antara tegangan pada bus- i (V_i) dan tegangan injeksi (V_s) adalah $0 < r < r_{maks}$ dan sudut fasa terkontrol sebesar $0 < \gamma < 2\pi$. Model injeksi diperoleh dengan menggantikan sumber tegangan \bar{V}_s dengan sumber arus $\bar{I}_s = -jb_s \bar{V}_s$ paralel dengan saluran dengan $b_s = \frac{1}{X_s}$

Pada UPFC, sumber tegangan hubungan paralel (Konverter-1) memiliki fungsi utama memberikan daya aktif yang diinjeksikan ke jaringan melalui sumber tegangan hubungan seri (Konverter-2), hubungan persamaan daya ditulis sebagai berikut:

$$P_{conv1} = P_{conv2} \quad (9)$$

Persamaan (9) diberlakukan ketika rugi-rugi diabaikan, suplai daya nyata oleh konverter sumber tegangan seri ditulis dengan persamaan:

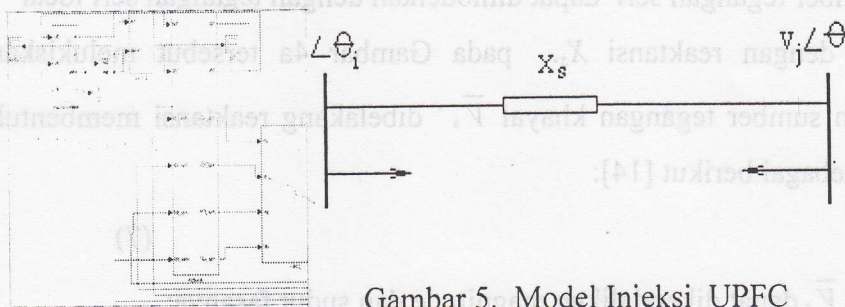
$$S_{conv2} = \bar{V}_s \bar{I}_{ij}^* = r e^{j\gamma} \bar{V}_i \left(\frac{\bar{V}_i' - \bar{V}_j}{jx_s} \right) \quad (10)$$

Suplai daya aktif dan reaktif oleh konverter-2 dibedakan sebagai;

$$P_{conv2} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_s V_i^2 \sin\gamma \quad (11)$$

$$P_{conv2} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) + rb_s V_i^2 \cos\gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (12)$$

Daya reaktif diberikan atau diserap oleh Konverter-1 secara bebas terkontrol oleh UPFC dan dapat dimodelkan sebagai sumber reaktif paralel kendali terpisah, dari gambaran tersebut, diasumsikan $Q_{conv1} = 0$. Penambahan daya ekuivalen ($P_{conv1} + j0$) ke bus- i pada model injeksi UPFC model sumber tegangan hubungan seri yang diberikan pada Gambar 4. sehingga Model UPFC diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model Injeksi UPFC

Persamaan injeksi daya UPFC diberikan sebagai berikut:

$$P_{si} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (13)$$

$$Q_{si} = r b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (14)$$

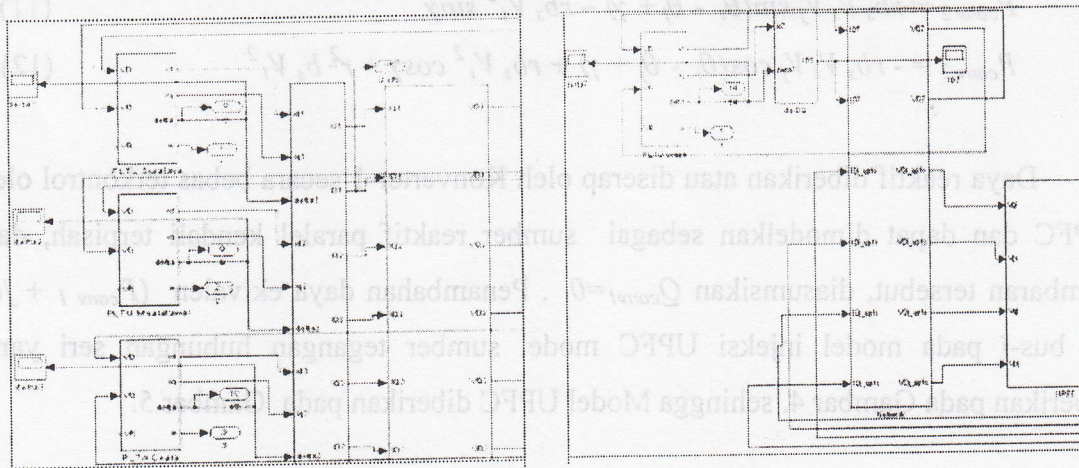
$$P_{sj} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ji} + \gamma) \quad (15)$$

$$Q_{sj} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (16)$$

UPFC pada Sistem Tenaga Listrik

UPFC dipasang pada jaringan Sistem 500 KV Jawa-Balidenngan simulasi Matlab 6.1. Sistem tenaga listrik 500 KV Jawa-Bali terdiri dari 7 pembangkit dan 19 bus. Bus yang tidak memiliki generator direduksi sehingga Matrik Adimatansi Jaringan menjadi orde 7 sesuai dengan jumlah pembangkit. Dengan melinierisasi persamaan injeksi daya UPFC sehingga diperoleh hubungan arus injeksi yang digabungkan kesaluran transmisi seperti ditunjukkan pada Blok Gambar 5.

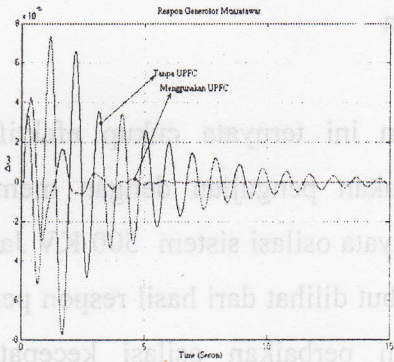
Gambar rangkaian simulasi sistem 500 KV Jawa-Bali diberikan sebagai berikut



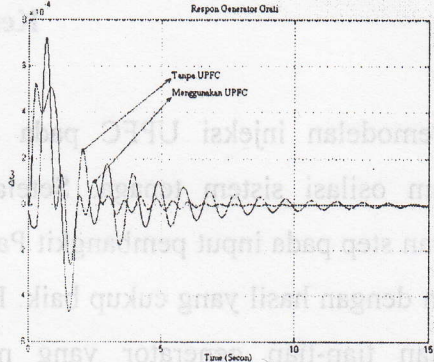
Gambar 5. Blok Simulasi Sistem 500 KV Jawa-Bali

Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan dengan memberikan gangguan berupa input step pada Generator Paiton. Respon yang diamati berupa perubahan kecepatan ($\Delta\omega$) dan perubahan sudut generator ($\Delta\delta$). Untuk mewakili ketujuh generator cukup diamati dua generator saja yaitu generator Muaratawar dan Generator Cirata.

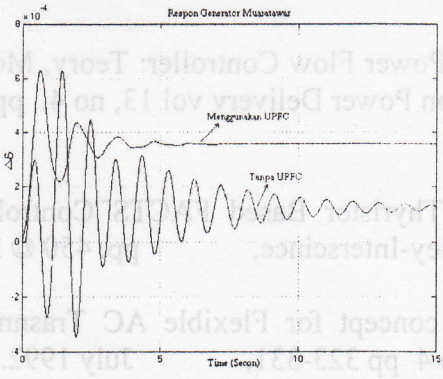


Gambar 6

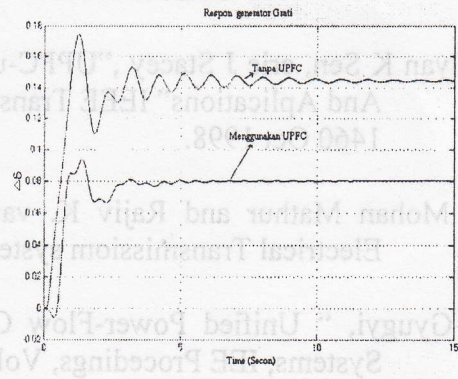


Gambar 7

Pada Gambar 6 memperlihatkan performansi perubahan kecepatan ($\Delta\omega$) untuk generator Muaratawar. Dari gambar tersebut osilasi diredam oleh UPFC pada waktu 7 detik. *Over-shoot* sistem menurun sebesar dari 7×10^{-6} menjadi 2.8×10^{-6} . Kondisi tersebut memperlihatkan pengaruh UPFC dalam meredam osilasi dinamis sistem tenaga. Sedangkan Gambar 7 generator Grati Konvergen pada saat 7.5 detik.



Gambar 8



Gambar 9

Pada Gambar 8 hasil simulasi yang menunjukkan performansi perubahan sudut generator Muaratawar menggunakan UPFC mengalami perbaikan redaman sehingga generator bekerja pada kondisi keserempakannya pada waktu 7 detik, walaupun terjadi

sedikit penyimpangan dari kondisi open loop, namun dari karakteristik gambar 4.10 tersebut perubahan letak posisi sudut rotor masih dalam batas sinkronisasi

Pada Gambar 9. diperlihatkan unjuk kerja osilasi perubahan sudut generator Grati dengan menggunakan UPFC mampu meredam osilasi pada waktu 10 detik dibandingkan dengan sistem tanpa menggunakan UPFC berosilasi lebih dari 15 detik.

Kesimpulan

Pemodelan injeksi UPFC pada penelitian ini ternyata cukup efektif dalam meredam osilasi sistem tenaga. Setelah dilakukan pengujian dengan memberikan gangguan step pada input pembangkit Paiton ternyata osilasi sistem 500 KV Jawa-Bali diredam dengan hasil yang cukup baik. Hal tersebut dilihat dari hasil respon perubahan kecepatan tiap-tiap generator yang mengalami perbaikan osilasi kecepatan dan perubahan sudut generator dengan penurunan overshoot dan waktu untuk mencapai konvergen.

DAFTAR PUSTAKA

- AA. Edris, Chair, "Proposed Term And Defenition for Flexible AC Transmissions System (FACTS)" IEEE Transaction on Power Delivery vol 12, no 4. pp. 1848-1853 October 1997.
- Kalyan K Sen, eric J Stacey , "UPFC-unified Power Flow Controller: Teory, Modelling And Aplications" IEEE Transaction on Power Delivery vol 13, no 4. pp. 1453-1460 Oct 1998.
- R. Mohan Mathur and Rajiv K. varma " Thyristor Based FACTS Controller For Electrical Transmissiom system. Willey-Interscience, pp. 450 © 2002
- L. Gyugyi, " Unified Power-Flow Control concept for Flexible AC Trasnmissions Systems, IEE Proceedings, Vol 139 no 4 pp 323-331, July 1992.
- A. Nabivi Niaki, MR. Iravani, " Steady-State And Dynamic Model Of Unified Power Flow Controller (UPFC) for power Systems Studie", IEEE Transc. Power Systems, vol 11 no 4 pp 1937-1943, November 1996
- K.R Padiyar, A.M. Kulkani , " Control Desaign And Simulation Of Unified Power Flow Controller", IEEE Transaction on Power Delivery vol 13, no 4. pp. 1348-1354 October 1998.

- M. Klein, G.J Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study Of Inter-Area Oscillation in Powers Systems," IEEE Transc. Power Systems, vol 6 no 3 pp 914-920, November 1991
- P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc 1994
- Kwang M. son, "A Newton Type Current injection Model of UPFC for Studying Low-Frequency Oscilations", IEEE Transaction on Power Delivery vol 19, no 2. pp. 694-701, April 2004.
- P.M. Anderson, AA. Fouad, "Power System Stability and Control" Iowa State Universuty Press, 1977
- L Gyugyi, Narain G.H, Understanding FACTS Concept and Technology Of Flexible AC Transmission Systems IEEE Press © 2000
- Yong Hua Song & Alans T Johns, "Flexible AC reansmission Systems (FACTS) IEE Power and Energy Series 30.press.1999
- L. Gyugyi, CD Schauder, "Operasion Of The Unified Power Flow Controller (UPFC) Under Practical Constrain," IEEE Transaction on Power Delivery Vol 13 No.2 pp 630-639. April 1998
- M Nooroozian, G. Anderson "Use Of UPFC for Optimal Power Flow Control," IEEE Transaction on Power Delivery Vol 13 No.2 pp 630-639. April 1998
- J Blan, A Edris, "A Studu of Equipment Sizes and Constrants for a Unified Power Flow Controller", IEEE Transaction on Power Delivery Vol 13 No.2 pp 1385-1391 Juli 1997