

PEMODELAN DAN SIMULASI PIRANTI *FLEXIBLE AC TRANSMISSIONSISTEM (FACTS DEVICES)-UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER* PADA SMIB-SISTEM TENAGA LISTRIK

Agus junaidi¹⁾, Rahmaniar²⁾, Rudi Salman³⁾, Joni Safrin Rambe⁴⁾, Baharuddin⁵⁾

^{1,3,4,5)} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UNIMED

Email: agusjunaidi@unimed.ac.id¹⁾, rudisalman@unimed.ac.id³⁾,
jonisafrin@unimed.ac.id⁴⁾, baharuddin@unimed.ac.id⁵⁾

²⁾ Prodi Teknik Elektro-FASTEK, Universitas Pembangunan Panca Budi
rahmaniar@dosen.pancabudi.ac.id⁵⁾

Abstrak

Unified Power Flow Controller (UPFC) mampu berperan sebagai piranti dalam pengendalian, Voltage Control, Transient Stability, Damping Power Oscillation, Ractive Power Compensation, Power Flow Controller dan SSR Mitigation. Penggunaan Fungsi UPFC sebagai piranti FACTS DEVICES untuk peredam Osilasi, Unified Power Flow Controller sebagai piranti Flexible AC Transmission Systems dengan parameter pengamatan tegangan, impedansi, dan sudut fasa dalam kajian studi stabilitas dinamis, pengaturan aliran daya serta keandalan pada sistem tenaga listrik dalam memperbaiki osilasi stabilitas sitem tenaga dengan pemasangan UPFC (Unified Power Flow Controller). Model sistem Single Machine Infinite Bus (SMIB) dengan UPFC yang dipasang pada saluran transmisi daya listrik, dapat memperbaiki osilasi, UPFC di modelkan dengan persamaan state-space kemudian model di susun dalam blok simulasi menggunakan Simulink. Step respon input simulasi digunakan sebagai asumsi adanya perubahan yang terjadi pada sistem akibat gangguan. Hasil simulasi, penggunaan UPFC sebagai piranti FACTS dapat memperbaiki Osilasi akibat gangguan dinamik pada sistem

Kata-Kata Kunci: FACTS Devices, UPFC, Damping Oscilation

I. PENDAHULUAN

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan sifat sistem yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal. Stabilitas sistem tenaga listrik terdiri dari (1) Stabilitas keadaan tetap (*steady state*) merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga keserempakannya akibat gangguan kecil, seperti perubahan beban yang masih normal, (2) Stabilitas peralihan (*transient*) merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga keserempakannya akibat gangguan besar, seperti hubung singkat, hingga *governor* memberikan aksi. Ayunan pertama rotor mesin akan terbentuk dalam waktu 1 detik mengikuti gangguan. (3) Stabilitas dinamis (*dynamic Stability*) merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga keserempakannya setelah ayunan pertama (periode stabilitas peralihan) sampai sistem membentuk kondisi keadaan tetap biasanya terjadi 1 sampai 1,5 detik setelah gangguan. Dalam studi stabilitas, untuk mengetahui apakah sistem tenaga listrik masih stabil atau tidak setelah adanya gangguan, diamati melalui variabel-variabel keadaan sistem sebagai indikator stabilitas, antara lain daya elektrik generator P_e . Studi Stabilitias yang tepat dan berkesinambungan sangat diperlukan untuk menganalisis sistem supaya dapat bekerja dengan efektif. Untuk mempelajari stabilitas dinamis digunakan pemodelan terhadap

komponen-komponen seperti generator, saluran transmisi, dan beban. Pemodelan ini diturunkan dari persamaan matematis berupa persamaan differensial linier untuk mewakili perilaku dinamika sistem [1]

Penggunaan UPFC dalam memperbaiki stabilitas dinamik . perbaikan dinamis sistem tenaga listrik juga dapat dilakukan dengan menggunakan Power System Stabilizer (PSS) dimana PSS menerapkan sistem eksitasi. Dengan UPFC dengan sinyal masukan modulasi Amplitudo Exiter dapat menggantikan PSS dan UPFC nantinya diharapkan memberikan performance yang lebih baik dibandingkan PSS. Kemampuan dari UPFC dibandingkan dengan FACTS devais lainnya seperti ditunjukkan pada Tabel di bawah ini[2]:

Contro ller	Volt age Con trol	Tran sient Stabi lity	Damp ing Power Oscill ation	Rac tive Pow er Co mp.	Powe r Flow Contr oller	SSR Mitig ation
BESS	*		*			
SMES		*	*			
SSSC	*	*	*	*	*	*
STAT COM	*	*	*	*		
SVC	*	*	*	*		
TCPS T		*	*		*	*
TCSC	*	*	*		*	*
TSBR		*	*		*	*
TSSC	*	*	*		*	*
UPFC	*	*	*	*	*	*

II. REVIEW TINJAUAN TEORITIK FACTSDEVICES

Sinyal masukan ke *Unified Power Flow Controller* (UPFC) dapat menggantikan *power sistem stabilizer* yang diterapkan ke sistem eksitasi, diharapkan juga dapat memberikan redaman osilasi sistem tenaga listrik yang lebih baik. Model sistem tenaga listrik dipasang UPFC dengan sinyal masukan yang diterapkan ke UPFC dibentuk ke dalam persamaan differensial linier, kemudian dibentuk persamaan variabel keadaan diterapkan ke masukan UPFC dapat digunakan untuk analisis stabilitas dinamis. Penerapan pemasangan UPFC dengan sebagai sinyal masukan UPFC memberikan unjuk kerja yang lebih baik dibanding dengan sistem tenaga listrik konvensional [3].

Pemodelan dynamic dan model transient dari sebuah penerapan perangkat *Unified Power Flow Controller* (UPFC) yang akan dipasang disaluran transmisi sebagai piranti untuk meregulasi dan melakukan pengaturan seperti aliran daya, kestabilan dynamic dan stabilitas transient, mengembangkan suatu pemodelan matematis UPFC untuk studi Keadaan Mantap (*Steady-State*) dengan strategi kendali UPFC control strategy melalui mitigasi SSR, Stabilitas Transient dan Eigen Value. Model UPFC dibentuk dalam persamaan variable keadaan (*State-space*) serta dapat menentukan lokasi UPFC serta strategi kendali serta parameter UPFC yang optimal. Akurasi dari pemodelan diperoleh secara terperinci menggunakan simulasi *Electromagnetic Transient Program* (EMTP), Diperoleh uraian komprehensif dan sistematis suatu Pendekatan untuk pemodelan matematika dari *Unified Power Flow Controller* (UPFC) Berdasarkan pendekatan model steady state, linierisasi signal kecil dan model dynamic variabel keadaan (*state space*). Model-model tersebut dapat diberlakukan untuk kasus dan kajian studi aliran daya, Analisis eigen dan stabilitas transient [4].

Persoalan osilasi sistem tenaga listrik untuk sistem tenaga listrik multi mesin. Fungsi peredam FACTS berbasis stabilizer untuk meredam osilasi dinamis sistem tenaga listrik. Osilasi dinamis sistem tenaga multi mesin terjadi akibat gangguan temporer atau gangguan pelepasan beban tiba-tiba menyebabkan ketidakstabilan, penerapan UPFC pada sistem tenaga listrik Multi mesin dapat meredam osilasi akibat gangguan. Melalui perangkat UPFC yang sebagai divais elektronika daya dipasang pada saluran transmisi. UPFC terdiri dari exciting transformer (ET) yang terhubung seri dengan saluran, Boosting transformer (BT) terhubung paralel dengan saluran, dua konverter sumber tegangan atau dalam implementasinya disebut sebagai konverter bersumber tegangan (*Voltage Source Converter*) yang masing-masing terhubung secara paralel dan seri dengan saluran transmisi melalui Coupling Transformeryaitu BT dan ET. Kedua konverter ini terhubung satu sama

lain melalui dc common link yang berupa dc capacitor storage. Hal ini dimaksudkan agar daya aktif dapat mengalir bebas melalui kedua konverter tersebut, dan setiap konverter dapat menyerap atau membangkitkan daya reaktif secara bebas pada masing-masing keluarannya. 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. Dengan kendali redaman yang diterapkan melalui pemasangan UPFC berbasis PSS menunjukkan hasil simulasi mampu meredam osilasi sistem multi mesin (kestabilan sistem multi mesin) [5].

Teknologi kendali cerdas dengan model Kendali Fuzzy penerapan Takagi-Sugeno diaplikasikan pada sistem kendali piranti UPFC sebagai salah satu piranti Flexible AC Transmisi Ysystem (FACTS) yang dapat digunakan untuk mengontrol arus daya aktif dan reaktif dalam saluran transmisi dengan menyuntikkan tegangan variabel secara seri dan arus reaktif shunt. Kendali Fuzzy dengan penerapan Takagi-Sugeno (TS) untuk pengendali sumber tegangan kontrol inverter UPFC dalam sistem multi-mesin. Jenis piranti kontrol fuzzy dengan berbagai kontrol mendapatkan variasi penguatan (gain) dengan memasukkan inear dan non-linear berdasarkan rule fuzzy. Kendali sinyal masukan inverter yang diterapkan ke UPFC menggunakan TS-Fuzzy, diawali dengan membentuk sebuah diagram segaris multi machine sistem 500 KV. Perangkat 2 buah UPFC dipasang ditengah-tengah saluran transmisi antara bus 6 dan bus 7 dipasang UPFC-1 sedangkan bus 7 ke bus 8 dipasang UPFC-2. Model UPFC dibentuk ke persamaan matematis dengan memperhatikan daya aktif dan daya reaktif sisi pengirim dan sisi penerima pada saluran transmisi (Pr dan Qr, serta Ps dan Qs), PI controller digunakan untuk mengendalikan arus shunt. Kontrol Takagi - Sugeno (TS) dari jenis dari jenis Mamdani dimodelkan untuk diterapkan kepada plant (yang dikendalikan) kemudian untuk melihat unjuk kerja sistem dilakukan simulasi untuk membandingkan penggunaan kendali konvensional (PI) dengan

penerapana TS-Fuzzy UPFC. Piranti kontrol fuzzy non-linear dengan memiliki keuntungan luas dengan variasi kendali tegangan inverter dari UPFC yang diterapkan dalam sistem tenaga multi-mesin. Skema UPFC menggunakan skema kontrol yang diusulkan menghasilkan peningkatan redaman osilasi elektromekanis yang signifikan dari generator yang mengalami gangguan. Hasil simulasi menunjukkan perbandingan penggunaan kendali secara konvensional (PI-controller) dengan Penggunaan TS-FUZZY yang diterapkan ke UPFC menunjukkan perbaikan hasil osilasi yang signifikan menggunakan TS-FUZZY UPFC dibandingkan metode konvensional [6]

Lokasi pemasangan UPFC pada saluran transmisi yang optimal dilakukan dengan memodelkan sistem dengan menerapkan metode *Genetic Algorithm (GA)*. penempatan lokasi UPFC yang dipasang pada saluran transmisi dengan menggunakan metode Genetic Algorithm (GA) pada sistem interkoneksi 14 bus sistem tenaga listrik sebagai cara meningkatkan kualitas aliran daya dan kestabilan. Strategi yang dilakukan adalah (1) Inisialisasi input number function dari UPFC, (2) membangkitkan inisial populasi (3) Mengevaluasi fungsi objektif untuk penentuan kromosom, jika tidak tercapai maka dilakukan pembangkitan generasi baru dengan (*reproduction, cross over and mutation*), (3) Stop kriteria yang dicapai, jika yes maka akan diperoleh, fungsi objektif =1 maka decesisi untuk meningkatkan load factor, jika tidak maka terpilih kromosom terbaik, lalu end, Hasil simulasi UPFC yang optimal untuk Penempatan UPFC pada sistem daya yang tidak stabil karena Peningkatan beban telah disimulasikan, meningkatnya beban dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem kemudian dilakukan uji coba penempatan UPFC yang optimal melalui pendekatan GA dapat mengembalikan sistem ke kondisi stabil. [7]

Sebuah pendekatan/metode untuk mengetahui penempatan UPFC yang optimal melalui pendekatan Algoritma Genetika (GA) dan *Particle Swarm Optimization (PSO)*, dengan menguji pendekatan tersebut pada sistem IEEE 6-bus dan IEEE sistem tenaga 14-bus. menjelaskan model yang digunakan untuk menempatkan perangkat UPFC menggunakan metode Genetic Algorithm (GA) dan *Particle Swarm Optimization (PSO)* pada sistem interkoneksi sistem IEEE 6-bus dan IEEE sistem tenaga 14-bus. sebagai cara meningkatkan kualitas aliran daya dan kestabilan. Penggunaan Model Algoritma genetik dengan teknik pencarian stokastik menggabungkan fungsi evaluasi acak dan terstruktur dengan tahapan: (1) Sebuah *out line* Singkat Komputasi GA; Parameter kontrol GA, seperti ukuran populasi, probabilitas crossover dan probabilitas mutasi yang dipilih, dan populasi awal secara acak. Masing-masing individu, yang terdiri dari jumlah kromosom, merupakan solusi yang layak untuk masalah pencarian. Pada dasarnya, rata-rata

minimum dan maksimum kebugaran semua individu dalam satu generasi dihitung. (2) Perbaikan komputasi lanjutan; Sebuah titik crossover kemudian dipilih secara acak dan informasi dari salah satu orang tua sampai ke titik crossover ditukar dengan *parent* yang lainnya (3) Deskripsi PSO yang Diimplementasikan dalam Teknik optimasi; menerapkan PSO dengan fleksibilitas tinggi untuk mengontrol keseimbangan antara global dan eksplorasi lokal dalam ruang pencarian. Fitur PSO ini mengatasi masalah konvergensi prematur dan mempertinggi kemampuan pencarian algoritma PSO menjamin konvergensi untuk solusi optimal, Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kedua GA dan teknik PSO telah dilakukan dengan baik dan memiliki solusi berkualitas tinggi; konvergensi karakteristik stabil, dan efisiensi perhitungan yang baik menunjukkan bahwa GA dan PSO berhasil dapat mencapai pengaturan yang tepat dan penempatan UPFC. Instalasi UPFC di lokasi tersebut dapat secara signifikan meningkatkan keamanan sistem tenaga dengan menghilangkan atau meminimalkan garis kelebihan beban dan tegangan bus yang terlampaui (*over voltage*) [8].

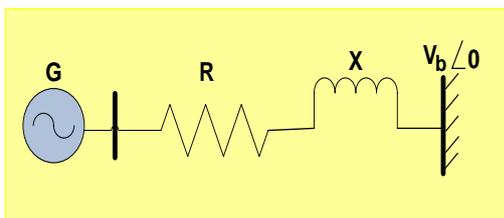
Model kontrol baru (*new-controller*) untuk UPFC dengan pengendali nonlinear dengan kondisi yang tahan terhadap kondisi perubahan operasi sistem tenaga serta melakukan uji perbandingan pemanfaatan PI kontroler dengan *new-controller* pada perangkat *Unified Power Flow Controller*. Model control dengan pengendali yang *update* (*new-controller*) dirancang untuk mengendalikan osilasi sistem tenaga mesin multi menggunakan perangkat UPFC. pengendali nonlinear independen dari operasi titik didefinisikan melalui kerangka acuan sinkron yang tepat untuk Model dinamis yang dapat disederhanakan. Koordinat Kerangka acuan didefinisikan di sumbu-d (*direct-axis*) dan selalu bertepatan dengan vektor tegangan sistem sesaat dan q – sumbu di kuadratur tersebut. Dengan mengubah model sistem untuk iniferensi frame, persamaan UPFC dapat ditulis dengan persamaan *d-q Model*. Untuk kendali *shunt controller*, pada bagian shunt dari UPFC dilakukan dua tahapan, pertama adalah untuk mengatur tegangan bus shunt besarnya pada nilai referensi dan yang kedua adalah untuk mempertahankan *link dc* pada tegangan kapasitor. Tegangan Besarnya bus *shunt* tergantung pada daya reaktif disuntikkan (di injeksikan), dimana tegangan *Link dc* tergantung pada daya aktif diserap oleh *konverter shunt* untuk mengisi kapasitor pada piranti UPFC. Karena itu pendekatan kontrol yang sama dapat dicapai di pada sistem kendalian ini. Desain kontroler ini untuk model yang telah dikaji dalam paper ini dapat memberikan hasil yang lebih baik daripada kontroler linear. kontroler yang diusulkan diimplementasikan pada area dua sistem tenaga. Hasilnya dibandingkan terhadap PI tradisional kontroler pada kondisi pembebanan yang berbeda. Menunjukkan hasil lebih baik dibandingkan model PI-Controller [9]

Pemodelan matematik yang dapat diterapkan dalam perhitungan dan pengaturan aliran daya melalui struktur kendali UPFC based on indirect matrix converter (UPFC - IMC) dalam keadaan steady state dan keadaan transient melalui sinyal kecil yang diekstraksi kepada UPFC-IMC. Pemodelan dari struktur baru UPFC berdasarkan UPFC based on indirect matrix converter (UPFC - IMC) yang dikendalikan oleh space vector modulation (SVM), dikembangkan untuk mempertimbangkan studi dinamis sistem tenaga. Melalui pemodelan disajikan, sementara dan performansi kestabilan UPFC - IMC untuk diteliti. Model matematik UPFC based on indirect matrix converter dibentuk dalam persamaan variabel keadaan (State-space) untuk melihat unjuka kerja proses pengendalian aliran daya dalam keadaan steady state dan transient. Hasil investigasi disajikan untuk keadaan steady-state dan transient dengan mensimulasikan sistem yang diusulkan melalui pemograman MATLAB mengubah setiap parameter sistem dari hasil simulasi dan visualisasi. Pemodelan yang diuji dalam simulasi dapat digunakan dalam berbagai studi termasuk distribusi beban perhitungan, menganalisis dan mensimulasikan nilai eigen values sistem tenaga untuk pengujian stabilitas steady state dan stabilitas transient yang dinamis dan terstruktur [10].

III. DESAIN MODEL SISTEM

a. Model Single Machine Infinite Bus (SMIB)

Sistem tenaga listrik yang terhubung pada sebuah bus tak terbatas di tunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram SMIB

Sistem mesin tunggal terhubung ke bus tak terbatas diatas akan dibentuk persamaan keadaan dan dengan menggunakan kontrol optimal akan disimulasikan unjuk kerja kestabilan dinamis. Model dan Simulasi Konsep Torsi Sinkron (Ts) dan Peredam (D)

Gambar 2. Plant Sistem

Persamaan mekanik sebuah generator tanpa beban:

$$T_m = m \cdot a$$

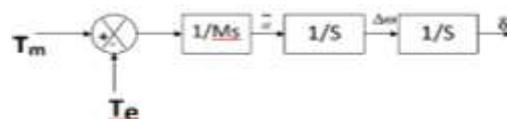
$$T_m = m \frac{d\omega}{dt} \tag{1}$$

Jika generator dibebani maka torsi mekanik akan dipengaruhi oleh torsi elektrik:

$$T_m - T_e = m \frac{d^2 \delta}{dt^2} \tag{2}$$

$$T_m - T_e = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{M} = \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

maka dari persamaan diatas dapat dibuat blok diagram sebagai berikut:



Gambar 3. Model gerak mekanik

Sistem peredaman (D) sebagai torsi tambahan untuk menstabilkan rotor mesin serempak dalam sistem ini, redaman yang diberikan dengan membuat torsi yang negatif sebanding dan sefasa dengan perubahan rotor ($\Delta\omega$), Maka:

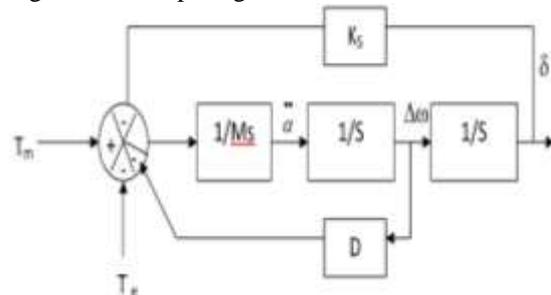
$$T_D = D \cdot \Delta\omega \tag{3}$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms} (\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta\omega) \tag{4}$$

Posisi sudut juga mempengaruhi torsi lawan dengan yaitu torsi sinkronisasi, dengan persamaan:

$$T_s = K_s \delta \tag{5}$$

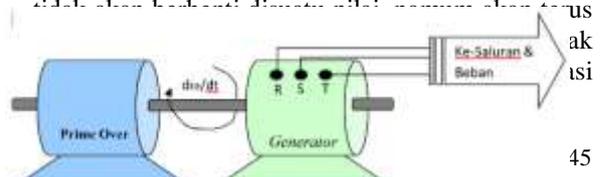
dari persamaan (3) dan (5) maka blok diagram dapat digambarkan seperti gambar 4:



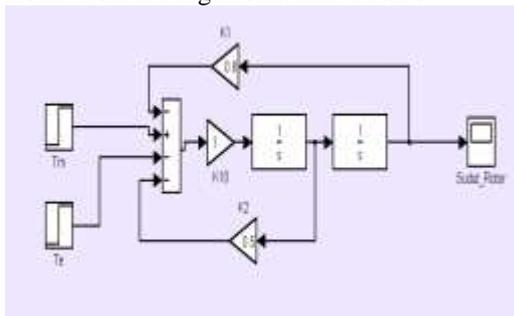
Gambar 4. Blok diagram dengan pengaruh Ts dan D

b. Konsep Simulasi Ts Dan Redaman (D)

Keadaan sistem dinyatakan stabil jika harga koefesien torsi sinkronisasi K_1 dan Koefesien redaman D harus positif [3], sebab bila harga K_1 atau D negatif maka akan terjadi umpan balik negatif, bila nilai K_1 negatif maka sudut daya mesin sinkron tidak akan kembali dimata nilai nominal oleh arus

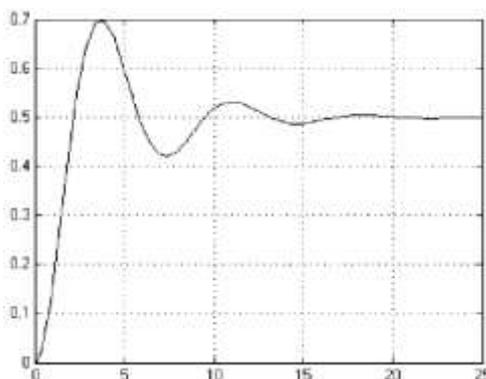


menggunakan blok simulasi gambar (5.a) disimulasikan dengan simulink Matlab

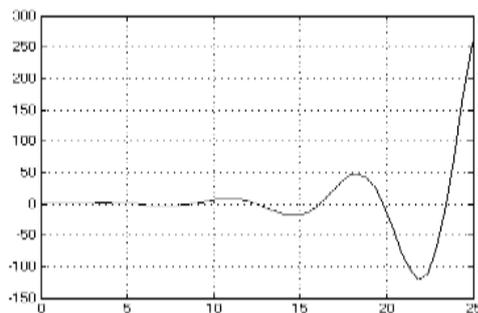


Gambar 5(a) Blok dengan Simulink

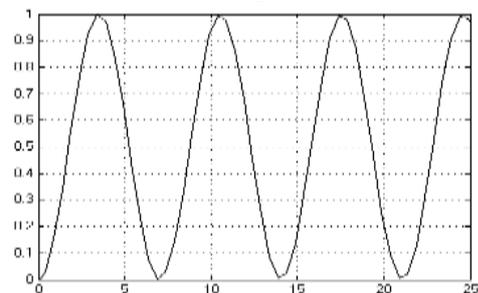
Hasil simulasi dari gambar 5.a. secara berturut-turut ditunjukkan pada gambar 5.b sampai dengan gambar 5.e



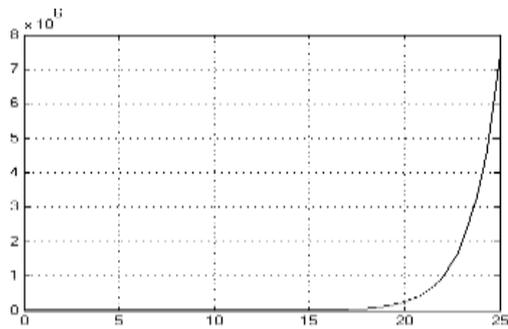
Gambar.5b. Simulasi jika nilai Ts dan D positif



Gambar.5c. Simulasi jika nilai D negatif



Gambar.5d. Simulasi jika nilai dan D Sangat Kecil



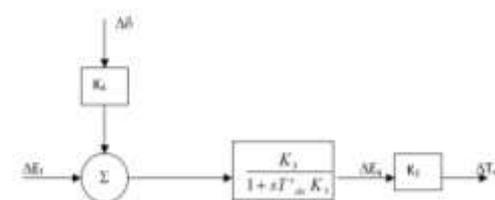
Gambar.5e. Simulasi jika Nilai Ts adalah negatif Gambar 5b samapi 5 e menunjukkan hasil simulasi dari model gambar 5.a.

c. Reaksi Jangkar

Pengaruh parameter K_4 terhadap kenaikan sudut rotor yang digambarkan pada blok diagram ditunjukkan pada gambar (6) di bawah.

Fungsi alih yang menggambarkan perubahan torsi dan sudut rotor [13], dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta T_E}{\Delta \delta} \Big|_{\text{karena } E_q} = - \frac{K_2 K_4 K_3}{1 + s T'_{do} K_3} \tag{6}$$



Gambar 6. Model Reaksi Jangkar

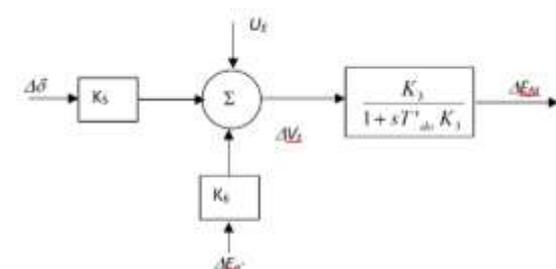
d. Pengaruh Pengaturan Tegangan

Blok diagram yang menggambarkan pengaruh pengaturan tegangan pada torsi peredam dan torsi serempak ditunjukkan pada gambar (7)

Fungsi alih yang menggambarkan sistem pengatur tegangan adalah:

$$\frac{\Delta E_{fd}}{\Delta V_t} = \frac{K_A}{1 + s T_A} \tag{7}$$

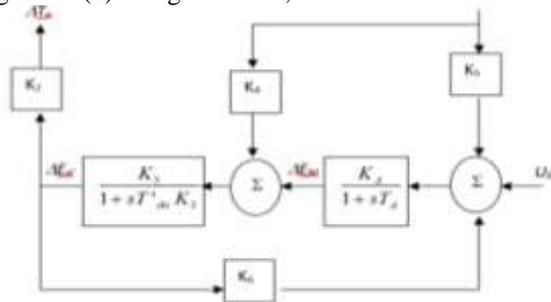
Untuk analisa gangguan kecil, simpangan tegangan terminal dapat dihubungkan dengan perubahan sudut $\Delta \delta$ melalui factor K_5 yang nilainya dapat berubah, kemudian, Perubahan fluks gandeng ΔE_q dihubungkan melalui K_6 yang nilainya selal positif dan berkurang dengan adanya pembebanan



Gambar 7. Pengaruh Pengaturan Tegangan

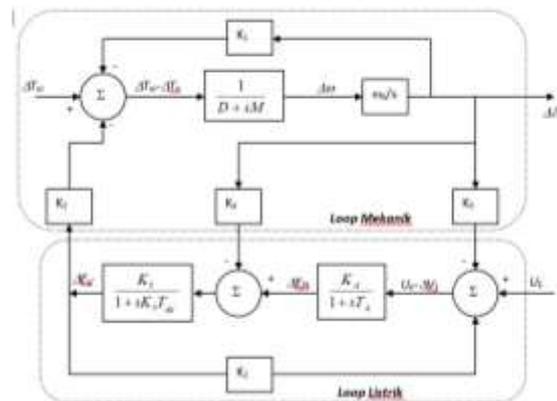
e. Perubahan tegangan Terminal

Perubahan beban juga merubah tegangan terminal, besar perubahan ini dinytakan dengan K_5 secara blok diagram proses dapat dilihat pada gambar (8) sebagai berikut;



Gambar 8. Perubahan Tegangan Terminal

Dari blok diagram gambar (3) sampai dengan gambar (8) maka model sistem tenaga listrik dapat digambarkan sebagai berikut: Blok diagram sistem tenaga listrik dapat diperlihatkan pada gambar 9 [13]:



Gambar 9. Diagram Blok Dinamik Gerak Sistem Tenaga Listrik

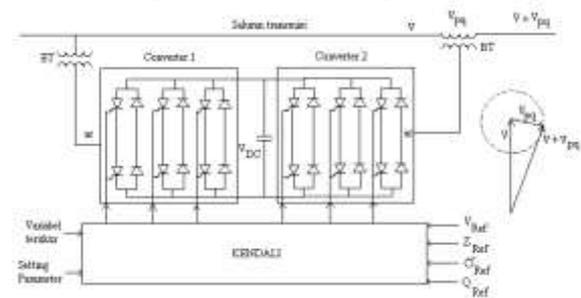
Torsi masukan $\Delta T_m - \Delta T_e$ sebagai masukan dan sudut torsi $\Delta \delta$ sebagai keluaran. Loop mekanik mempunyai dua blok fungsi alih dari kiri ke kanan, blok pertama didasarkan pada persamaan keseimbangan torsi, dan blok kedua menunjukkan hubungan sudut dan kecepatan untuk satuan yang dipilih. Pada blok ini M merupakan konstanta inersia, D merupakan koefisien peredam mekanik dan $2\pi f$ merupakan kecepatan serempak. Loop listrik memiliki Kendali tambahan U_E dikurangi tegangan terminal tambahan ΔV_t sebagai masukan, dan tegangan internal (ΔE_g) sebagai keluaran yang dikalikan K_2 sebagai pasangan tori elektrik ΔT_e . Loop listrik memiliki dua blok fungsi alih dari kanan ke kiri blok pertama mewakili sistem pengaturan tegangan dan eksitasi dengan konstanta waktu T_A dan penguat total K_A , blok kedua mewakili fungsi alih rangkaian medan sebagai pengaruh reaksi armatur, dengan konstanta waktu efektif $T_{do} \cdot K_3$ dan penguat K_3 .

ΔV_t terdiri dari dua komponen, $K_5 \Delta \delta$ disebabkan perubahan sudut torsi $\Delta \delta$ dan $K_6 \Delta E_g$ disebabkan oleh perubahan tegangan dalam ΔE_g . $\Delta V_t = V_t - V_{ref}$, tanda negatif diberikan kepada ΔV_t karena umpan balik negatif.

Didasarkan pada blok diagram tersebut, stabilitas sistem tenaga dipengaruhi oleh parameter K_1 sampai K_6 . K_1, K_2, K_3, K_4 , dan K_6 selalu positif, sedangkan K_5 dapat berubah dari positif ke negatif.

f. Model SMIB dengan UPFC

Model sistem tenaga listrik yang dipasang UPFC dalam penelitian ini terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. UPFC yang dipasang pada mesin tunggal yang dihubungkan ke bus tak terbatas

Persamaan variabel keadaan sistem tenaga listrik yang dipasang UPFC diberikan oleh:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta v_{dc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{u1}}{M} & -D & \frac{K_{u2}}{M} & 0 & \frac{K_{pd}}{M} \\ \frac{K_{u4}}{T_{d0}} & 0 & \frac{K_{u3}}{T_{d0}} & \frac{1}{T_{d0}} & \frac{K_{qd}}{T_{d0}} \\ \frac{K_A K_{u5}}{T_A} & 0 & \frac{K_A K_{u6}}{T_A} & \frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vd}}{T_A} \\ \frac{K_{u7}}{K_{ce}} & 0 & \frac{K_{u8}}{K_{cb}} & 0 & \frac{K_{u9}}{K_{c\delta b}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta v_{dc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{pe}}{M} & \frac{K_{p\delta e}}{M} & \frac{K_{pb}}{M} & \frac{K_{p\delta b}}{M} \\ \frac{K_{qe}}{T_{d0}} & \frac{K_{q\delta e}}{T_{d0}} & \frac{K_{qb}}{T_{d0}} & \frac{K_{q\delta b}}{T_{d0}} \\ \frac{K_A K_{vc}}{T_A} & \frac{K_A K_{v\delta e}}{T_A} & \frac{K_A K_{vb}}{T_A} & \frac{K_A K_{v\delta b}}{T_A} \\ \frac{K_{ce}}{K_{ce}} & \frac{K_{c\delta e}}{K_{cb}} & \frac{K_{cb}}{K_{cb}} & \frac{K_{c\delta b}}{K_{cb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_E \\ \Delta \delta_E \\ \Delta m_B \\ \Delta \delta_B \end{bmatrix}$$

Persamaan (8) merupakan model dinamik linear sistem tenaga yang dipasang UPFC, terlihat bahwa ada empat pilihan sinyal kendali masukan UPFC untuk membuat fungsi peredam UPFC, yakni $\Delta m_E, \Delta m_B, \Delta \delta_E$, dan $\Delta \delta_B$ [12].

Karenanya dalam perancangan pengendalian peredam UPFC pemilihan sinyal kendali masukan UPFC sangat penting. Berdasarkan hal tersebut, jika sinyal kendali masukan UPFC dipilih modulasi amplitudo $Exiter$ (Δm_E), maka persamaan (8) menjadi :

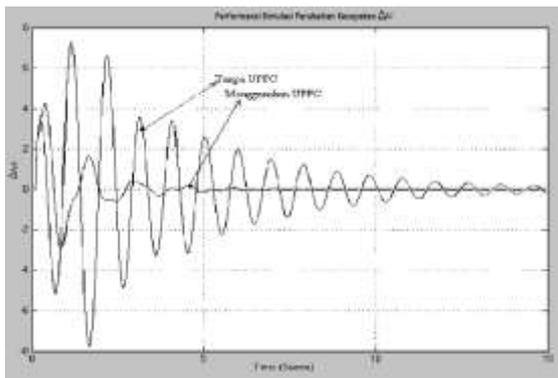
$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{u1}}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_{u2}}{M} & 0 & -\frac{K_{pd}}{M} \\ -\frac{K_{u4}}{T_{d0}} & 0 & -\frac{K_{u3}}{T_{d0}} & 1 & -\frac{K_{qd}}{T_{d0}} \\ -\frac{K_A K_{u5}}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_{u6}}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vd}}{T_A} \\ \frac{K_{u7}}{K_{cb}} & 0 & \frac{K_{u8}}{K_{cb}} & 0 & \frac{K_{u9}}{K_{cb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_{pd}}{M} \\ \frac{M}{K_{qb}} \\ -\frac{T_{d0}}{K_A K_{vb}} \\ \frac{T_A}{K_{cb}} \end{bmatrix} [\Delta m_E] \quad (9)$$

Persamaan (9) diatas merupakan persamaan dynamic untuk model SMIB setelah pemasangan UPFC.

IV. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

a. Pengujian gangguan penurunan daya elektrik

Gangguan penurunan daya elektrik diberikan sebesar 1 pu, osilasi yang terjadi akibat gangguan sistem tenaga listrik tanpa dan dengan penerapan piranti UPFC, hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Plot Respon Perubahan Kecepatan SMIB tanpa UPFC dan menggunakan Piranti UPFC

b. Pembahasan

Hasil pengamatan simulasi, ketika sistem diasumsikan menerima gangguan dengan memberikan input step respon. Sistem SMIB yang tidak diberi kendali UPFC mengalami osilasi sampai orde 15 detik, sedangkan dengan menggunakan pemasangan piranti UPFC, osilasi sistem dapat stabil pada waktu 5 detik dibandingkan tanpa menggunakan kendali UPFC. Overshoot sistem tanpa UPFC sebesar 7 pu sedangkan menggunakan UPFC overshoot osilasi sebesar 4 pu. Dari hasil pengujian menunjukkan pemasangan UPFC dapat meredam kestabilan dinamik sistem.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penulisan dapat disimpulkan sebagai berikut :

- (1). UPFC sebagai piranti FACTS Devices memiliki kemampuan yang baik dalam merespon gangguan yang menyebabkan terjadinya kestabilan dinamik
- (2). Hasil pengujian menunjukkan kemampuan UPFC dalam meredam osilasi sistem 3 kali lebih baik meredam osilasi dibandingkan dengan tidak menggunakan kendali, kemampuan UPFC dapat meredam osilasi.
- (3). Pemasangan UPFC dalam meredam osilasi dapat meningkatkan keandalan pelayanan kepada konsumen dilihat dari *overshoot* osilasi sistem, redaman kendali UPFC jauh lebih baik menyelesaikan ketidakstabilan dinamik, dilihat dari hasil pengujian simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. K. S. Arabi, 1996, "A Versatile FACTS Devices Model for power Flow and Stability Simulations" *IEEE*, vol. 11, no. 4, pp. 1944-1950, November 1996.
- [2] R. M. m. a. r. K. Varma, 2002, *Thyristor based FACT Controllers For Electrical Transmission Systems*: Wiley-Interscience
- [3] H.F.Wang, 1999, *Damping function of unified power flow controller*" *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, vol. 146, No. 1.
- [4] A. N.-N. M. R. Iravani, " Steady-State And Dynamic Models Of Unified Power Flow Controller (Upfc) For Power System Studies" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, No. 4, November 1996.
- [5] H. Wang, 1998, "A Unified Model For Analyisi Of FACTS DEVICES In Damping Power Sistem Oscilation Part II: Multi Machine Power Systems," *IEEE tranction On Power Delivery*, vol. 13 No 4, Okt 1998.
- [6] I. K. D. a. G. P. S.Mishra, "TS-fuzzy Controller for UPFC in a Multimachine Power Sistem " *IEE Proc.-Gener. Trunsm. Distrib.*, vol. 147, No. 1, pp. 15-22, Juwuury 2000
- [7] A. K. Arabkhaburi, M.Yari, J. Aghaei, "Optimal Placement of UPFC in Power Systems Using Genetic Algorithm," *IEEE*, 2006
- [8] G. I. R. H. I. Shaheen, S. J. Cheng, "Optimal Location and Parameters Setting of UPFC based on GA and PSO for Enhancing Power Sistem Security under Single Contingencies," *IEEE*, 2008

- [9] P. C. P. Jose.P.Therattil, "***Damping of Power Sistem Oscillations using an Advanced Unified Power Flow Controller***" *IEEE PEDS*, December 2011
- [10] E. B. Farzad Mohammadzadeh Shahir, "***Dynamic Modeling of UPFC based on Indirect Matrix Converter***," *IEEE*, 2012
- [11] F. J. S. H.F Wang, "***A unified Model for analysis of FACTS devices in Damping Power Systems Oscillatioan part I : Single Machine Infinite Bus power sistems***," *IEEE*, vol. 12 no 2 pp. 941-946, April 1997.
- [12] F. J. S. H.F Wang, "***A unified Model for analysis of FACTS devices in Damping Power Systems Oscillatioan part III : Unified power Flow Controller***," *IEEE*, vol. 15 no 3, pp. 978-983, July 2000.
- [13] P. Kundur, "***Power Sistem Stability and Control***", *McGraw-Hill, Inc.* © 1994