

KOORDINASI PENGENDALI EKSITASI DAN GOVERNOR DENGAN MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Toto sukisno* Agus Maman Abadi** Giri Wiyono*

*Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FT UNY Kampus Karangmalang Yogyakarta

**Jurusan Matematika FMIPA UNY Kampus Karangmalang Yogyakarta

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang kordinasi pengendali eksitasi dan governor pada sebuah mesin sinkron dengan menggunakan logika fuzzy. Penelitian ini diawali dengan membuat model matematik dari sistem tenaga listrik kedalam persamaan variabel keadaan, yang dilanjutkan dengan membentuk model diagram yang merupakan plant sistem. Plant dikendalikan oleh kombinasi sinyal eksitasi tambahan yang sering dikenal dengan PSS dan sinyal governor tambahan. Kedua sinyal tersebut dibangkitkan dengan menggunakan logika fuzzy.

Struktur sistem pengendali logika fuzzy disusun dengan menggunakan tiga masukan. Pengujian unjuk kerja sistem yang telah terbentuk dilakukan dengan memberikan gangguan kenaikan dan penurunan daya elektrik, yang selanjutnya diamati hasil tanggapan dinamis dari osilasi sudut rotor generator. Hasil pengujian selanjutnya dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan sinyal eksitasi dan governor tambahan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan logika fuzzy dalam pembangkitan sinyal masukan pada eksitasi dan governor dapat memperbaiki tingkat dan waktu redaman yang cukup signifikan untuk letak gangguan yang berbeda.

Kata-kata Kunci: pengendali eksitasi dan governor, logika fuzzy

A. Pendahuluan

Perkembangan yang pesat dalam bidang ketenagalistrikan sebagai akibat dari tuntutan konsumen (*demand*) yang semakin meningkat menimbulkan konsekwensi tersendiri bagi penyedia jasa ketenagalistrikan. Salah satu dampak yang muncul seiring dengan eskalasi permintaan tersebut adalah meluasnya topologi jaringan yang berujung pada kompleksitas pengelolaan jaringan. Dengan demikian, pencapaian tujuan dari pelaku bisnis ketenagalistrikan untuk menjaga kontinuitas pelayanan dan memelihara mutu listrik menjadi semakin tidak mudah. Selain itu, ketidakteraturan permintaan beban yang setiap saat berubah mengakibatkan kinerja sistem tenaga listrik mendekati batas aman, sehingga

pengendalian operasi sistem tenaga listrik sebagai salah satu elemen penting dalam pengelolaan jaringan yang bertujuan untuk memenuhi pembangkitan dan kebutuhan beban juga bertambah kompleks dan rumit (*sophisticated*).

Kondisi operasi tersebut juga akan berakibat pada terganggunya kondisi mantap (*steady state*) dari sistem, oleh karena itu permasalahan kestabilan menjadi persoalan yang semakin mendesak dan dominan. Persoalan kestabilan sistem tenaga listrik telah dibahas secara luas. Beberapa sumbangan penting telah diperoleh, tidak hanya dalam segi analisis dan penjelasan fenomena dinamis, tetapi juga dalam usaha perbaikan kestabilan sistem transmisi. Diantara teknik-teknik tersebut, pengendalian generator merupakan salah satu yang paling banyak dipakai dalam industri tenaga listrik. Dalam teknik ini, sebagian besar perhatian ditujukan terhadap pengendalian eksitasi yaitu pengendalian terhadap arus DC pada belitan medan dari generator .

Dalam banyak kasus, pengendali eksitasi didasarkan pada pengendali Proportional Integral Deferensial (PID) dengan Single Input Single Output (SISO), pengendali linear Multi Input Multi Output (MIMO), pengendali linear dan tak linear optimal, pengendali kecerdasan seperti pemakaian jaringan syaraf tiruan dan logika fuzzy. L.A Zadeh menyajikan paper pertama teori himpunan fuzzy pada tahun 1965, dan selanjutnya dikembangkan bahasa baru untuk menggambarkan sifat-sifat fuzzy dari kondisi yang sebenarnya. Penggunaan logika fuzzy menawarkan sebuah metode yang dapat diterapkan dalam sebuah kasus yang tidak memungkinkan untuk memakai metode tradisional. Salah satu contoh tentang penggunaan logika fuzzy dalam sistem tenaga listrik adalah untuk menggambarkan kompleksitas gangguan sistem secara teliti.

Sebuah pengendali berbasis logika fuzzy yang sederhana dibangun dari sebuah kumpulan aturan yang didasarkan pada pengetahuan manusia tentang perilaku sistem. Teori himpunan fuzzy secara luas digunakan dalam ruang lingkup pengendalian dan beberapa diantaranya diterapkan pada pengendalian sistem tenaga listrik.

Di bidang rekayasa sistem tenaga listrik, teori himpunan fuzzy dipakai dalam pengendalian sistem tenaga, perencanaan, dan beberapa bagian yang lain,

misalnya untuk mendesain penyetabil sistem tenaga (PSS). Dalam perancangan penyetabil sistem tenaga akan mengabaikan perilaku sistem governor (penggerak mekanik dari poros sebuah generator) dalam mendesain pengendali eksitasinya. Alasan dari pengabaian kendali ini adalah dikarenakan responnya yang lambat dibandingkan respon dari sistem eksitasi. Akan tetapi pengendalian yang tepat dari sistem governor membantu dalam sistem peredaman osilasi dan perbaikan kestabilan peralihan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian tentang perilaku sistem governor bila digabungkan dengan sistem eksitasi sebagai upaya untuk membantu peredaman osilasi.

Dalam penelitian ini akan dilakukan pengamatan terhadap peredaman osilasi dari koordinasi pengendali governor dan pengendali eksitasi yang menggunakan kompensasi logika fuzzy pada masing-masing masukan pengendalinya pada waktu terjadi fluktuasi pembebahan pada sistem tenaga listrik yang dalam penelitian ini diidentifikasi sebagai sebuah gangguan. Parameter-parameter seperti kecepatan (w), kecepatan percepatan ($P_m - P_e$) dan tegangan terminal (V_t) generator diperoleh pada karakteristik osilasi.

B. Kajian Pustaka

Himpunan fuzzy (fuzzy set) adalah himpunan yang anggotanya diinterpretasikan dengan fungsi keanggotaan, yang merupakan pemetaan dari m_A pada domain X ke range [0, 1]. Tetapi hanya dengan fungsi keanggotaan, himpunan fuzzy sangat sulit dibayangkan.

Untuk menjelaskan masalah ini, para ahli masalah logika fuzzy selalu menggambarkan himpunan fuzzy dalam bentuk grafik dua dimensi, dengan sumbu x merepresentasikan domain X. Jadi geometri dari himpunan fuzzy terdiri dari domain X dan range [0, 1] yang merupakan fungsi pemetaan $m_A: X \rightarrow [0, 1]$.

Untuk mengkombinasikan antar himpunan fuzzy digunakan aturan yang sama dengan himpunan konvensional. Irisan, gabungan, dan komplemen dari dua himpunan fuzzy didefinisikan sebagai berikut:

$$M_{(A \cap B)} = \min(m_A, m_B)$$

$$M_{(A \cup B)} = \max(m_A, m_B)$$

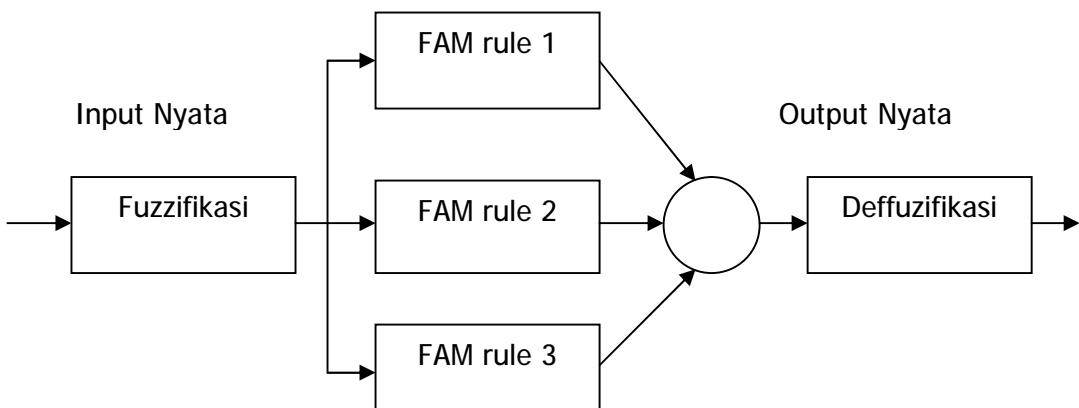
$$M_{(A^C)} = 1 - m_A$$

1. Sistem Fuzzy

Sistem fuzzy dapat diartikan sebagai suatu transformasi yang memetakan antara himpunan fuzzy ke himpunan fuzzy yang lain. Pada dasarnya sistem fuzzy berlaku sebagai sekumpulan memori yang menyimpan seluruh informasi pemetaan. Sekumpulan memori ini disebut sebagai *fuzzy associative memories* atau sistem FAM. Sistem FAM ini terdiri dari sekumpulan aturan FAM yang diproses secara paralel. Dalam bentuk *linguistik conditional*, aturan FAM dapat dinyatakan dengan “Jika X= A maka Y= B”.

2. Konfigurasi Dasar dalam Sistem Fuzzy

Konfigurasi dasar sistem fuzzy terdiri dari tiga komponen, yaitu: fuzzifikasi, sistem FAM dan defuzzifikasi. Gambar 1 menunjukkan konfigurasi dasar dari tiga bangunan tersebut.



Gambar 1. Konfigurasi Sistem Fuzzy

3. Fuzzifikasi

Bagian fuzzifikasi mentranslasikan hasil pengukuran variabel input ke dalam kaidah variabel linguistik. Pada bagian ini didefinisikan seperangkat nilai linguistik untuk variabel masukan. Nilai dari variabel linguistik, dispesifikasikan menggunakan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy. Hasil dari translasi ini adalah kumpulan himpunan fuzzy yang anggotanya mencerminkan hasil pengukuran variabel input.

4. Sistem FAM

Pada dasarnya sistem FAM menirukan kemampuan manusia dalam proses pengambilan keputusan. Berdasarkan seluruh informasi yang disimpan dalam sistem FAM secara paralel dan informasi dari fuzzifikasi, sistem FAM akan memproses seluruh FAM *rules* untuk memutuskan output nyata yang dibutuhkan. Pada sistem FAM tersimpan seluruh informasi penting untuk mengendalikan output. Informasi ini dapat diperoleh dengan melakukan analisis terhadap sistem atau berdasarkan hasil eksperimen yang diperoleh dari operator.

Setiap masukan A ke sistem FAM mengaktifkan tiap aturan FAM yang tersimpan dengan derajat berbeda. FAM minimal menyimpan (A_i , B_i) yang memetakan masukan A ke B'_i , dengan B'_i adalah B yang teraktifkan sebagian. A yang semakin menyerupa A_i , menyebabkan B'_i semakin menyerupa B_i . B dapat dituliskan sebagai:

$$B = \sum_{i=1}^m w_i B_i$$

Dengan w_i merupakan bobot yang menyatakan keandalan, frekwensi, atau kekuatan kumpulan fuzzy (A_i , B_i). Biasanya digunakan $w_i = 1$.

5. Desain Pengendali Fuzzy

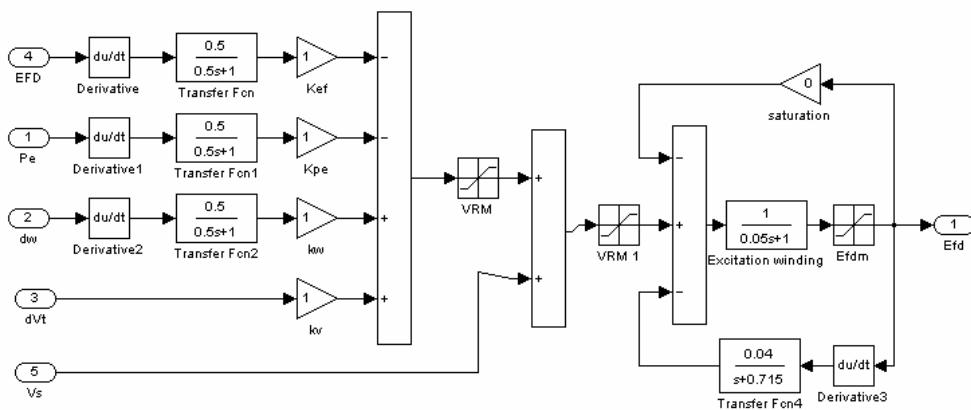
Perilaku dasar dinamis sebuah generator dapat diperlihatkan berdasarkan pemanfaatan sebuah mesin tunggal pada sistem bus tak terhingga, sehingga dalam penelitian ini desain skema pengendali akan diujicobakan pada mesin (generator) sinkron tunggal. Menurut Yao-nan Yu (1983), sebuah mesin sinkron telah memiliki peredaman mekanis yang cukup memadai untuk dirinya akan tetapi tidak cukup untuk pengoperasian mesin dalam sistem tenaga listrik yang besar sehingga diperlukan peredaman tambahan. Sejauh ini peredaman tambahan diberikan melalui pemberian sinyal tambahan pada sistem eksitasi dan governor. Menurut Hadi Saadat (1999), pengendalian daya nyata dan daya reaktif yang merupakan implikasi dari pemakaian dua sistem pengendali yaitu pengendali eksitasi (*power system stabilizer*) dan pengendali governor dilakukan secara terpisah. Dengan demikian, tidak ada koordinasi antara governor dan eksitasi

ketika merespon gangguan pada sistem tenaga listrik. Model pengendalian yang terpisah tersebut masih memungkinkan untuk jenis gangguan ringan, akan tetapi untuk gangguan yang cukup besar bisa mengakibatkan mesin terlepas dari kondisi sinkronnya sehingga diperlukan penggabungan kedua sistem pengendali tersebut untuk mendapatkan daerah kestabilan yang cepat ketika terjadi gangguan pada sistem.

Dalam penelitian ini, model pengendali governor yang akan digunakan adalah pengendali PID tradisional, sedangkan pengendali eksitasi yang digunakan adalah pengendali optimal linear (LOEC) yang keduanya dirujuk dari model IEEE.

a. Desain Pengendali Eksitasi Optimal Linear (LOEC)

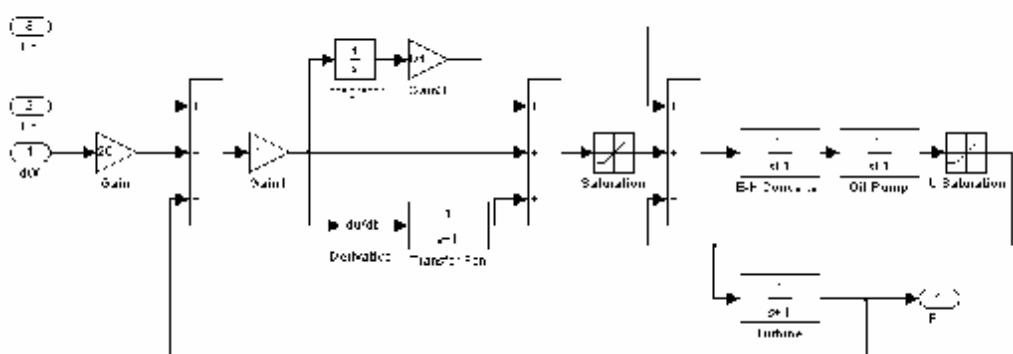
Linear optimal excitation control (LOEC) merupakan sebuah penerapan teori kendali optimal modern pada sistem tenaga listrik. Daya keluaran (P_e), kecepatan (w), tegangan keluaran (V_t) dan tegangan medan eksitasi (E_{fd}) mesin sinkron merupakan besaran-besaran umpan balik (*feedback*) yang lazim digunakan pada pengendali eksitasi. LOEC didesain dengan melinearkan sistem non linear pada sebuah titik operasi. Koefisien-koefisien K diperoleh dari metoda pengendali optimal yang dimodifikasi dengan koefisien penguat tinggi (*high gain*) untuk memperbaiki tampilan. Masukan V_s adalah sebuah sinyal kompensasi yang dibangkitkan dengan menggunakan logika fuzzy. Model LOEC berdasarkan IEEE ditunjukkan dalam gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok LOEC Model IEEE

b. Desain Pengendali Governor

Sebuah model pengendali PID tradisional digunakan dalam pengendali governor yang dirujuk dari model IEEE, seperti ditunjukkan pada gambar 3. Parameter-parameter ditetapkan nilainya berdasarkan hasil analisis, selanjutnya masukan U_s adalah sebuah sinyal kompensasi yang dibangkitkan dengan logika fuzzy.



Gambar 3. Diagram Blok Pengendali Kecepatan Model IEEE

c. Desain Kompensasi Logika Fuzzy

Satu tujuan dari pengendali generator adalah untuk menjaga operasi generator setelah terjadi beberapa gangguan sistem yang tidak diperkirakan. Beberapa tampilan yang menunjukkan kekacauan, diantaranya adalah waktu osilasi atau peredaman sistem dimana lebih cepat lebih baik, sedangkan yang lain adalah kemampuan alih sistem dimana pengalihan daya merupakan sesuatu yang lebih baik.

Dalam penelitian ini sistem yang akan digunakan adalah sistem yang paling sederhana, dimana sebuah mesin tunggal dengan bus tak terhingga. Pada sistem tersebut keluaran daya generator secara umum dinyatakan sebagai berikut:

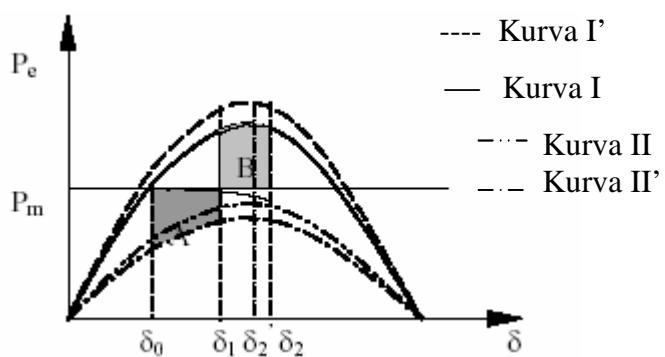
$$P_e = \frac{E_q V_s}{X_d} \sin d$$

Bilamana ada gangguan dalam saluran transmisi, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4. Mesin akan berputar selama kurva II periode gangguan. Daerah A *Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA* M-23

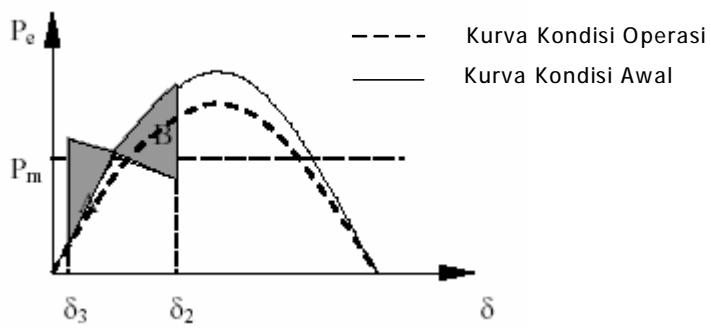
merupakan laju penambahan energi dan daerah B merupakan laju penurunan energi. Untuk meredam sistem sesegera mungkin, daerah A dan B harus menjadi lebih kecil. Dua besaran yang memungkinkan akan diambil. Pertama adalah untuk mengurangi daya mekanik P_m masukan dan yang satunya adalah untuk meningkatkan daya listrik P_e keluaran. Kurva perputaran yang diharapkan adalah kurva II' pada waktu periode gangguan dan kurva I' setelah gangguan. Kemudian sudut internal maksimum diturunkan dari d_2 ke d_2' . Operasi ini dapat dicapai dengan menaikkan tegangan dan menurunkan P_m .

Perilaku setelah ayunan pertama akan mengikuti uraian yang sama sebagai berikut: kenaikan tegangan dan penurunan daya mekanik pada waktu mesin dalam kondisi percepatan, penurunan tegangan dan penambahan daya mekanik pada waktu mesin dalam perlambatan. Penjelasan yang sederhana dapat dilihat pada diagram gambar 5 dan gambar 6.

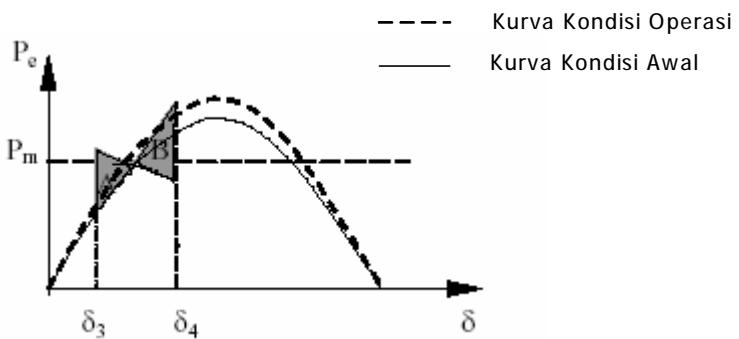
Dengan menganggap reaksi kelambatan sistem yang menggerakkan, dua sinyal kompensasi U_S dan V_S dibangkitkan melalui loop logika fuzzy, yang mana memiliki tiga blok dalam kaidah logika fuzzy, yaitu fuzzifikasi variabel masukan, aturan fuzzifikasi dan defuzzifikasi untuk membangkitkan keluaran. Kaidah logika fuzzy dalam pengendali eksitasi dan governor ditunjukkan dalam gambar 7.



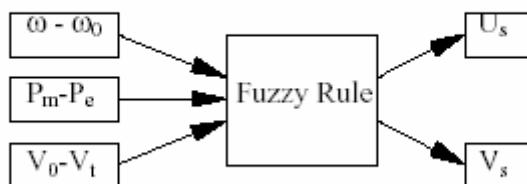
Gambar 4. Kaidah Sama Luas dari Osilasi Generator pada Ayunaan Pertama



Gambar 5. Perilaku Dinamis yang Diharapkan Ketika Kenaikan δ



Gambar 6. Perilaku Dinamis yang Diharapkan Ketika Penurunan δ



Gambar 7. Diagram Blok Kaidah Logika Fuzzy

C. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan terhadap sebuah mesin tunggal dengan bus tak terhingga. Data spesifikasi dari mesin diperoleh dari data IEEE. Peralatan yang

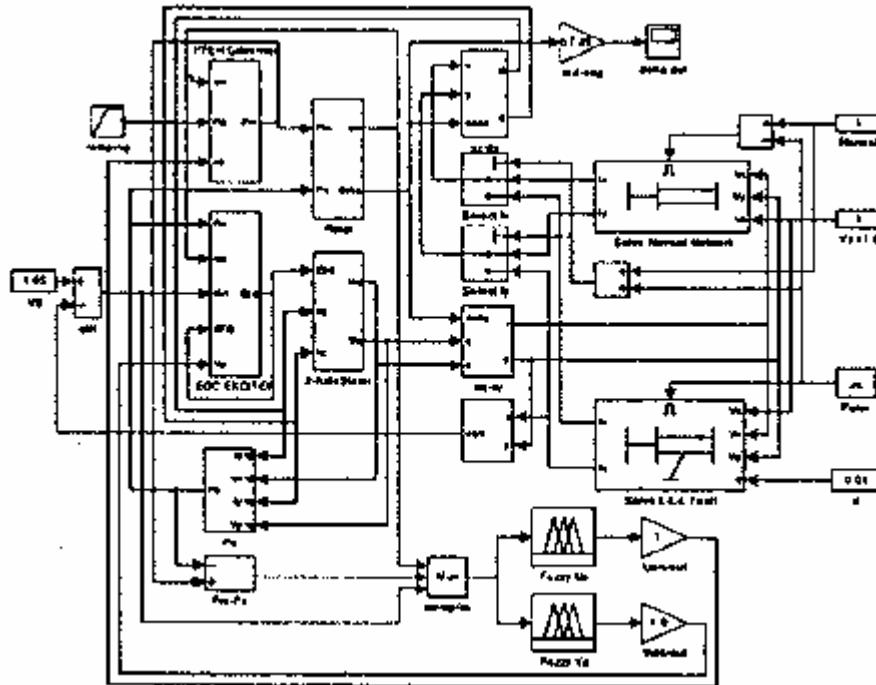
digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer PC beserta perangkat lunak Simulink Matlab versi 6.1.

Ada empat tahap yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu: perancangan model kendali optimal pada sistem eksitasi, perancangan model kendali governor, penyusunan rule keanggotaan fuzzy, dan pembuatan rancangan model dalam kawasan perangkat lunak Matlab untuk melihat watak respon dari penggabungan dua kendali tersebut.

D. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Penggabungan desain skema dari model pengendali eksitasi dan pengendali governor ditunjukkan dalam gambar 8, dengan data-data spesifikasi generator dan sistem sebagai berikut:

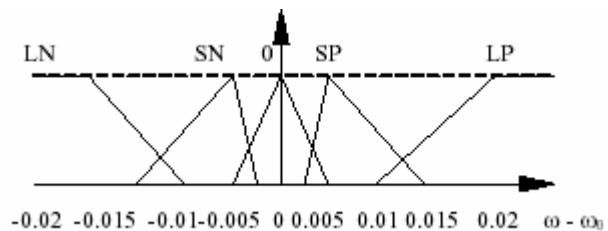
X_d	X_q	X_d'	X_q'	X_2	T_{do}'
1,2	1,2	0,2	0,2	0,2	6,0
T_{go}	H	D	X_T	X_L	P_N
0,6	10	2	0,2	1,6	1,0



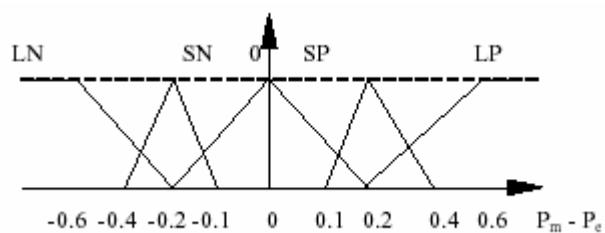
Gambar 8. Diagram Sistem yang Disimulasikan dalam Kawasan Simulink

Langkah-langkah dalam membangun diagram sistem di atas, dapat dijelaskan sebagai berikut:

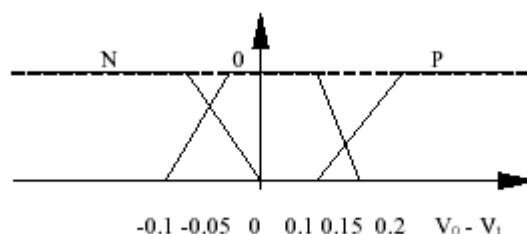
Pertama, membuat fuzzifikasi dari masing-masing variabel masukan, yang hasilnya ditunjukkan dalam gambar 9, 10 dan 11.



Gambar 9. Fuzzifikasi Variabel Masukan $\omega - \omega_0$



Gambar 10. Fuzzifikasi $P_m - P_e$



Gambar 11. Fuzzifikasi variabel masukan $V_o - V_t$

Kedua, menyusun aturan dari masing-masing variabel Us dan Vs, yang hasilnya ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2 dengan syarat $V_o - V_t$ tidak sama dengan P.

Tabel 1. Aturan Logika Fuzzy untuk Us

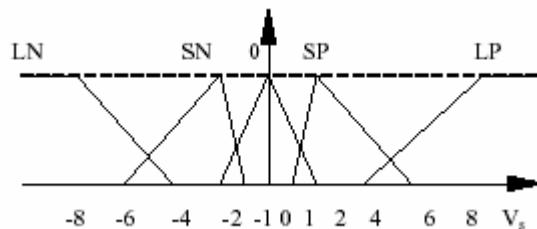
$d\omega/dP$	LN	SN	0	SP	LP
LN	SN	SN	SN	0	SP

SN	SN	SN	0	0	SP
0	SN	0	0	0	SP
SP	SN	0	0	SP	SP
LP	SN	0	SP	SP	SP

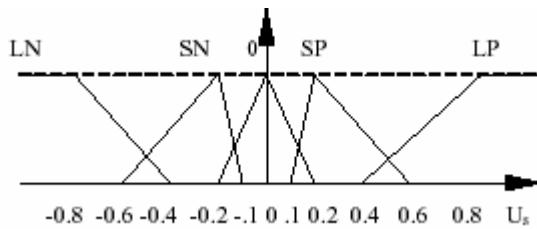
Tabel 2. Aturan Logika Fuzzy untuk Vs

dω\dp	LN	SN	0	SP	LP
LN	LN	LN	LN	LN	SN
SN	SN	SN	0	0	0
0	SN	0	0	0	SP
SP	LP	LP	LP	LP	LP
LP	LP	LP	LP	LP	LP

Selanjutnya, proses defuzzifikasi dari masing-masing variabel Us dan Vs ditunjukkan pada gambar 12 dan 13.

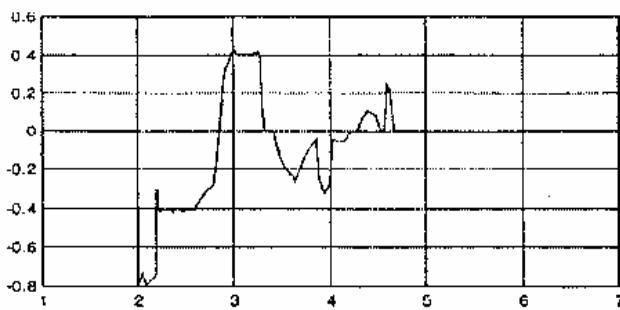


Gambar 12. Defuzzifikasi dari Vs

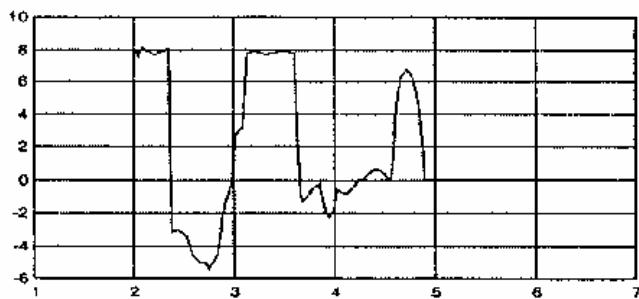


Gambar 13. Defuzzifikasi dari Us

Hasil dari sinyal Us dan Vs yang dibangkitkan dengan menggunakan logika fuzzy berdasarkan perangkat lunak simulink ditunjukkan pada gambar 14 dan 15.

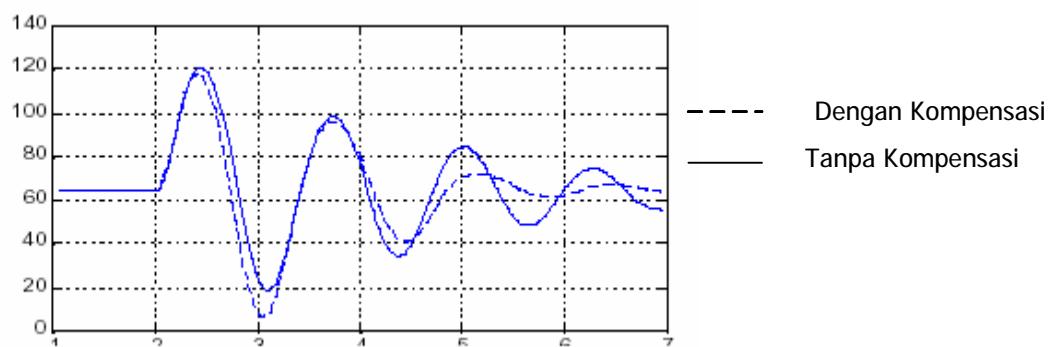


Gambar 14. Sinyal Us yang Dibangkitkan dengan Logika Fuzzy



Gambar 15. Sinyal Vs yang Dibangkitkan dengan Logika Fuzzy

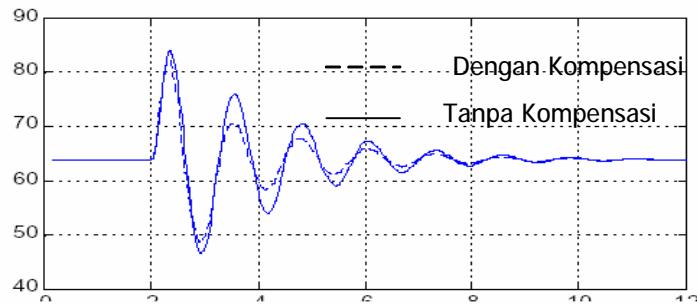
Dalam simulasi, generator dioperasikan pada kondisi awal keluaran daya $P_o = 0.6 \text{ p.u}$ dan tegangan terminal $V_t = 1.03 \text{ p.u}$. Gangguan tiga phasa terjadi pada $t = 2.0$ detik di awal saluran tunggal dan 0.2 detik diujung saluran. Hasil simulasi dengan perbandingan osilasi sudut internal d generator dalam 2 kasus, yaitu dengan kompensasi logika kabur dan tanpa kompensasi logika kabur ditunjukkan pada gambar 16.



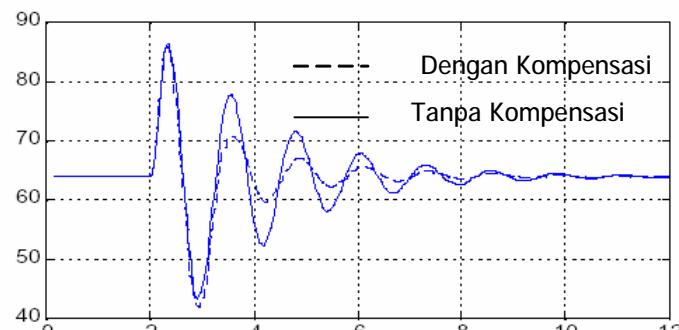
Gambar 16. Perbandingan Osilasi Sudut Internal Generator

Kedua, menguji kestabilan peralihan saluran transmisi melalui pemberian gangguan tiga fasa pada awal saluran transmisi. Hasil simulasi perbandingan

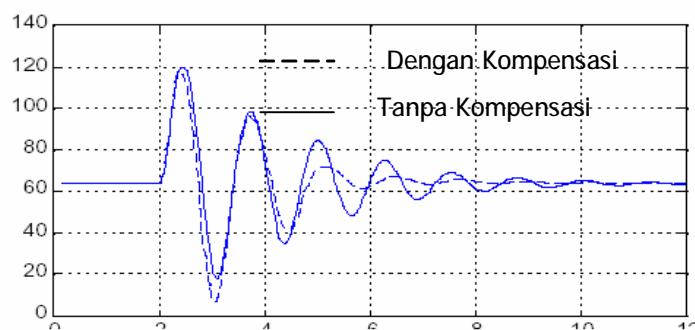
osilasi sudut internal d generator untuk tiga kasus berturut-turut, yakni gangguan di awal ujung saluran transmisi, di tengah saluran transmisi dan di awal/pangkal saluran transmisi ditunjukkan pada gambar 17, 18 dan 19.



Gambar 17. Perbandingan Osilasi Sudut Internal Generator dengan Gangguan di Ujung Saluran Transmisi



Gambar 18. Perbandingan Osilasi Sudut Internal Generator dengan Gangguan di Tengah Saluran Transmisi



Gambar 19. Perbandingan Osilasi Sudut Internal Generator dengan Gangguan di Awal/Pangkal Saluran Transmisi

Berdasarkan visualisasi grafis dari masing-masing respon yang ditunjukkan pada gambar 16, 17, 18 dan 19 dapat dijelaskan bahwa secara umum kompensasi pengendali eksitasi dan governor dengan menggunakan logika kabur dapat menekan dan mempercepat peredaman osilasi pada generator. Hal ini bisa diamati berdasarkan waktu osilasi dari masing-masing respon yang ditunjukkan, yaitu: untuk pemberian gangguan di ujung saluran transmisi melalui kenaikan beban dengan kisaran 10 %, maka waktu osilasi yang dibutuhkan sudut internal generator dengan menggunakan kompensasi sinyal tambahan eksitasi dan governor berbasis logika fuzzy dan tanpa menggunakan kompensasi relatif sama, namun tingkat osilasi mesin sinkron dengan pemberian sinyal kompensasi pada eksitasi dan governor lebih rendah dibandingkan dengan mesin sinkron yang tidak diberi kompensasi.

Respon yang berbeda ditunjukkan oleh visualisasi pada gambar 18 dan 19 yang bentuknya relatif hampir sama, yaitu respon dari mesin sinkron yang diberi sinyal kompensasi pada eksitasi dan governor berbasis logika fuzzy ketika saluran transmisinya diberi gangguan pada titik tengah dan titik awal maka tingkat osilasinya lebih rendah serta waktu osilasi sudut internalnya jauh lebih cepat dibandingkan dengan mesin sinkron yang tidak diberi kompensasi pada eksitasi maupun governornya.

E. Kesimpulan dan Saran

1. Kesimpulan

- Ø Desain pengendali sinyal tambahan pada eksitasi dan governor pada sebuah mesin sinkron tunggal yang terhubung bus tak terhingga dapat dibangkitkan dengan menggunakan logika fuzzy yang keanggotaannya disusun berdasarkan kajian teori. Semakin lengkap susunan keanggotaan fuzzy, akan berakibat pada kenaikan performa dari mesin sinkron dalam menghadapi variasi pembebanan yang dalam penelitian ini diidentifikasi sebagai jenis gangguan.

- Ø Kompensasi pengendali eksitasi dan governor dengan menggunakan logika fuzzy akan mempercepat peredaman osilasi generator sinkron pada sistem bus tak terhingga bila terjadi gangguan tak terduga.

2. Saran

Rancangan pengendali eksitasi dan governor dalam penelitian merupakan jenis pengendali linier sehingga hanya mampu diterapkan pada sistem yang perubahan bebannya masih dianggap linier, oleh karena itu perlu dikembangkan rancangan pengendali yang bisa diterapkan dalam daerah beban yang non linier.

DAFTAR PUSTAKA

- A.A Sallam, K.A El Serapi and T.M Abdel Azim, " *A Near-Optimal Fuzzy Logic Stabilizer For Weakly Connected Power Systems*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2000.
- Brunelle, Patrice. (2000). *Power System Blockset*. Teqsim Internastional. Canada.
- Saadat, Hadi, 1999, Power System Analysis, McGraw-Hill Co, Singapore
- Yao-nan Yu, 1983, " *Electric Power System Dynamics*", Academic Press, New York.