

Pemodelan dan Analisa Sistem Eksitasi Generator

Heru Dibyo Laksono^{1,*}, M. Revan¹⁾, Azano Rabirahim¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang

Email: heru_dl@ft.unand.ac.id^{*})

Abstrak

Jurnal ini membahas pemodelan dan analisa sistem eksitasi generator. Model sistem eksitasi generator yang digunakan meliputi model sistem eksitasi generator tipe arus searah, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback*, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan model sistem eksitasi generator tipe statik. Untuk analisa sistem eksitasi generator meliputi analisa performansi dalam domain waktu yang meliputi analisa kesalahan dan analisa peralihan, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Hasil analisa memperlihatkan bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* memiliki performansi, kestabilan dan kekokohan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem eksitasi generator tipe arus searah, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan sistem eksitasi generator tipe statik.

Kata kunci: sistem eksitasi generator, kesalahan, peralihan, performansi, kestabilan, kekokohan

Abstract

This journal discusses the modeling and analysis of generator excitation system. Generator excitation system models used include the type of generator excitation system model of direct current, generator excitation system model of direct current type to Rate Output Feedback, generator excitation system model of direct current type with Transient Gain Reduction and generator excitation system model of static type. To analyze of generator excitation system includes performance analysis in the time domain which includes the error and transition analysis, performance analysis in the frequency domain, stability and robustness analysis. The Result of the analysis showed that the generator excitation system in direct current type with rate output feedback has performance, stability and robustness are better than the generator excitation system in direct current type, generator excitation system in direct current type with Transient Gain Reduction and generator excitation system of static type.

Keywords: Generator Excitation System, Error, Transient, Performance, Stability, Robustness

1. Pendahuluan

Sistem eksitasi adalah suatu peralatan yang bertugas menjaga tegangan dan daya reaktif generator agar tetap pada nilai kerja yang diinginkan. Suatu kenaikan daya reaktif pada sisi beban akan mengakibatkan penurunan magnitude tegangan terminal. Penurunan tegangan terminal ini kemudian akan disensor oleh suatu potensial transformator. Selanjutnya tegangan terminal akan disearahkan dan dibandingkan dengan suatu titik nilai acuan (Laksono, 2014). Pengatur sinyal kesalahan penguat akan mengatur tegangan eksitasi sehingga tegangan eksitasi generator akan meningkat. Jika tegangan eksitasi meningkat maka daya tegangan yang dibangkitkan oleh generator akan meningkat pula. Sistem eksitasi generator merupakan elemen penting untuk membentuk profil tegangan terminal generator yang stabil. Sistem pengoperasian unit eksitasi generator ini berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan keluaran generator (Eremia & Shahidepour, 2013).

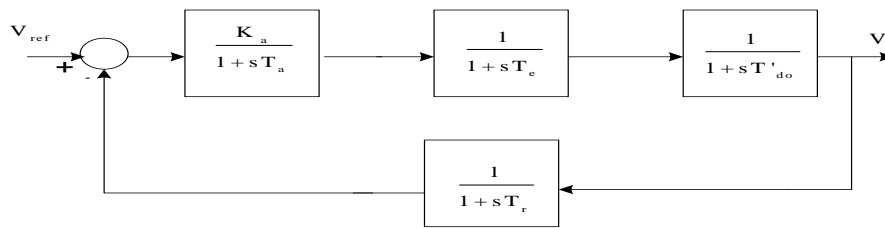
Selain itu sistem eksitasi generator yang digunakan mempunyai berbagai tipe. Setiap tipe sistem eksitasi ini mempunyai karakteristik yang berbeda – beda. Dengan adanya berbagai tipe dari sistem eksitasi ini maka karakteristik dari sistem eksitasi generator akan berbeda- beda pula. Agar pengoperasian sistem eksitasi generator ini berjalan efisien dan efektif maka perlu dilakukan studi untuk mengetahui karakteristik dari setiap tipe sistem eksitasi. Sebelum studi dilakukan maka terlebih dahulu ditentukan model matematis dari setiap sistem eksitasi generator. Adapun model sistem eksitasi generator yang digunakan dalam penelitian ini adalah model sistem eksitasi generator tipe arus searah, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback*, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan model sistem eksitasi generator tipe statik. Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai karakteristik dari model – model sistem eksitasi generator ini diantaranya (Nagendra & Krishnarayalu, 2012) membahas pengendalian sistem eksitasi generator dengan menggunakan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan bantuan Simulink dan model sistem eksitasi generator yang digunakan adalah model sistem eksitasi generator tipe arus searah. (Singh, Agarwal, & Singh, 2013) membahas pengendalian sistem eksitasi generator dengan menggunakan pengendali Proporsional Integral Diferensial dan *Fuzzy Logic Control* dengan bantuan perangkat lunak Matlab. Pada jurnal ini model sistem eksitasi generator yang digunakan adalah model sistem eksitasi generator tipe arus searah. (Bhatt & Bhongade, 2013), membahas perancangan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) pada sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan teknik PSO. (Liu, Mohamed , Kerdphol , & Mitani, 2014) membahas tentang perancangan pengendali PID – MPC pada sistem eksitasi generator tipe arus searah. Berdasarkan hasil – hasil penelitian sebelumnya terlihat bahwa tipe sistem eksitasi generator yang paling banyak digunakan adalah sistem eksitasi generator tipe arus searah tetapi karakteristik dari sistem eksitasi generator tipe arus searah itu sendiri tidak dibahas secara mendetail. Untuk itu dilakukan kajian tentang karakteristik dari model – model sistem eksitasi generator dengan tujuan untuk memperoleh informasi mengenai performansi dalam domain waktu, performansi dalam domain frekuensi, kestabilan dan kekokohan dari masing – masing model sistem eksitasi generator tersebut. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan informasi dari sistem eksitasi generator.

Analisa mengenai karakteristik dari berbagai model sistem eksitasi generator ini dilakukan dengan beberapa asumsi sebagai berikut

1. Model sistem eksitasi generator yang dianalisa adalah model sistem yang bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu.
2. Model sistem eksitasi generator bersifat satu masukan dan satu keluaran.
3. Analisa yang dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi.
4. Analisa dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab.

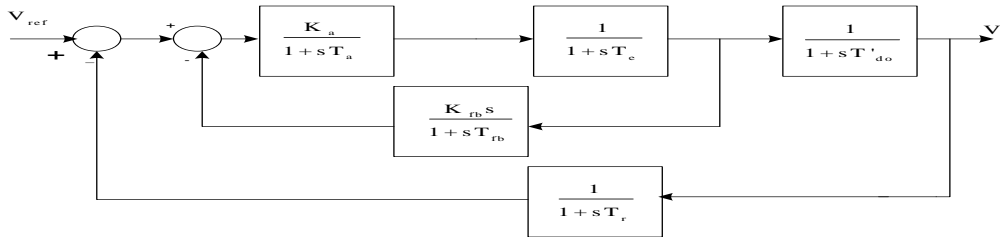
2. Metoda Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur tentang berbagai tipe sistem eksitasi generator dan pemodelan sistem eksitasi generator. Model sistem eksitasi generator yang digunakan adalah model sistem eksitasi generator tipe arus searah, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback*, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan model sistem eksitasi generator tipe statik. Untuk model sistem eksitasi generator tipe arus searah direpresentasikan dengan diagram blok yang diperlihatkan pada Gambar 1.berikut



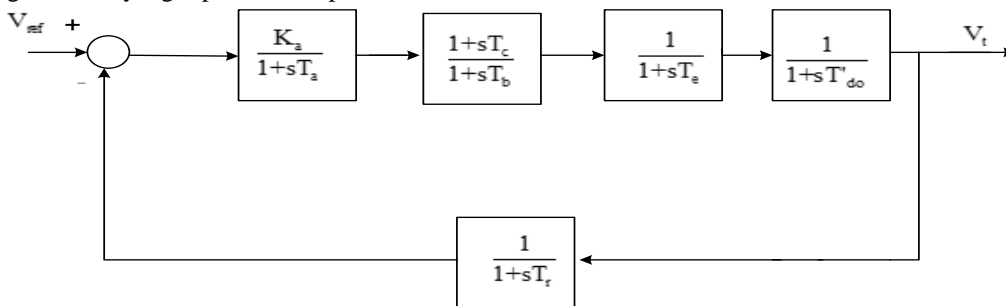
Gambar 1. Model Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah (Graham,1999)

Untuk model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* direpresentasikan dengan diagram blok yang diperlihatkan pada Gambar 2.berikut



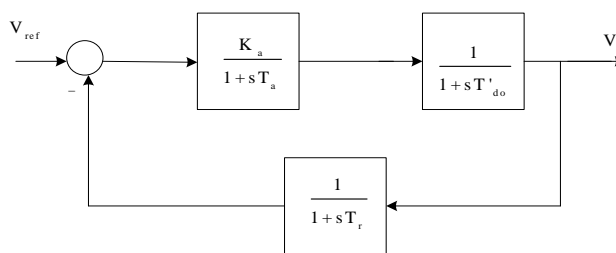
Gambar 2. Model Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Dengan *Rate Output Feedback* (Graham,1999)

Untuk model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* direpresentasikan dengan diagram blok yang diperlihatkan pada Gambar 3. berikut



Gambar 3. Model Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Dengan *Transient Gain Reduction* (Graham,1999)

Untuk model sistem eksitasi generator tipe statik direpresentasikan dengan diagram blok yang diperlihatkan pada Gambar 4. berikut



Gambar 4. Model Sistem Eksitasi Generator Tipe Statik (Graham,1999)

Selanjutnya dengan menggunakan nilai parameter – parameter model sistem eksitasi generator yang terdapat pada (Graham, 1999) diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari model – model sistem eksitasi tersebut dengan tegangan terminal sebagai keluaran dan tegangan referensi sebagai masukan. Setelah diperolehnya fungsi alih dari model – model sistem eksitasi generator kemudian dilanjutkan dengan analisa sistem eksitasi generator. Analisa yang dilakukan meliputi analisa performansi dalam domain waktu, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan.

Untuk analisa performansi dalam domain waktu, analisa yang dilakukan terdiri dari analisa kesalahan dan analisa peralihan. Untuk analisa kesalahan, adapun parameter yang diamati terdiri dari tipe sistem, konstanta kesalahan posisi, konstanta kesalahan kecepatan, konstanta kesalahan percepatan, kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan, kesalahan keadaan mantap untuk masukan laju satuan dan kesalahan keadaan mantap untuk

masukan parabolik (Ogata, 1996). Untuk analisa peralihan, parameter yang diamati terdiri dari waktu naik, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum, waktu puncak dan nilai puncak. Selain itu menurut (Skogestad & Postlethwaite, 1996) parameter – parameter yang diamati dalam analisa peralihan dapat dibagi menjadi 2 kategori yaitu kecepatan tanggapan dan kualitas tanggapan. Adapun parameter – parameter dari analisa peralihan yang termasuk kedalam kategori kecepatan tanggapan adalah waktu naik, waktu keadaan mantap dan waktu puncak sedangkan untuk kategori kualitas tanggapan adalah lewatan maksimum dan nilai puncak. Model sistem eksitasi generator akan mempunyai performansi dalam domain waktu yang baik jika nilai dari waktu naik, waktu keadaan mantap dan waktu puncak yang kecil sedangkan untuk lewatan maksimum kurang dari 20 % (Skogestad & Postlethwaite, 1996).

Untuk analisa performansi dalam domain frekuensi terdiri dari analisa performansi lingkaran terbuka dan analisa performansi lingkaran tertutup. Untuk analisa performansi lingkaran terbuka, parameter yang diamati meliputi margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa. Menurut (Saadat, 1999), model sistem eksitasi generator akan mempunyai performansi dalam domain frekuensi yang baik jika nilai margin penguatan besar dari 6 dB dan nilai margin fasa berkisar antara 30 derajat sampai 60 derajat. Untuk analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, parameter yang diamati meliputi lebar pita, nilai puncak resonansi dan frekuensi puncak resonansi. Menurut (Skogestad & Postlethwaite, 1996), model sistem eksitasi generator akan mempunyai performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi yang baik jika mempunyai nilai lebar pita yang besar dan nilai puncak resonansi yang berkisar antara 1.10 s/d 1.50.

Untuk analisa kestabilan dilakukan dengan menggunakan persamaan karakteristik (Franklin, Powell, & Naeini, 1986). Analisa kestabilan dengan persamaan karakteristik ini dilakukan dengan menggunakan denominator fungsi alih lingkaran tertutup dari setiap model sistem eksitasi generator. Denominator fungsi alih lingkaran tertutup ini berbentuk persamaan polinomial dan dikenal sebagai persamaan karakteristik. Model sistem eksitasi akan bersifat stabil jika bagian nyata dari akar – akar persamaan karakteristik bernilai negatif dan analisa terakhir yang dilakukan adalah analisa kekokohan. Analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Model sistem eksitasi generator akan bersifat kokoh jika nilai puncak maksimum sensitivitas yang kurang dari 2.00 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer yang kurang dari 1.25 (Skogestad & Postlethwaite, 1996). Berdasarkan hasil analisa tersebut kemudian ditentukan model sistem eksitasi generator yang paling baik.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini dilakukan analisa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator. Analisa yang dilakukan meliputi analisa performansi dalam domain waktu, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Analisa – analisa tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab. Model sistem eksitasi generator yang dianalisa terdiri dari model sistem eksitasi generator tipe arus searah, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback*, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan model sistem eksitasi generator tipe statik.

Untuk analisa performansi dalam domain waktu terdiri dari analisa kesalahan dan analisa peralihan. Untuk model – model sistem eksitasi generator yang digunakan diperoleh hasil analisa kesalahan yang diperlihatkan pada Tabel 1. berikut

Tabel 1. Analisa Kesalahan Sistem Eksitasi Generator

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Rate Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Kriteria	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Tipe Sistem	0	0	0	0
Konstanta Kesalahan Posisi	50.0000	180.0000	0.0500	180.0000
Konstanta Kesalahan Kecepatan	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Konstanta Kesalahan Percepatan	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk	0.0196	0.0055	0.9524	0.0055

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Rate Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Masukan Undak Satuan				
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju Satuan	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik Satuan	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga

Untuk tanggapan kesalahan keadaan mantap sistem eksitasi generator terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 5. berikut



Gambar 5. Tanggapan Kesalahan Keadaan Mantap Model – Model Sistem Eksitasi Generator

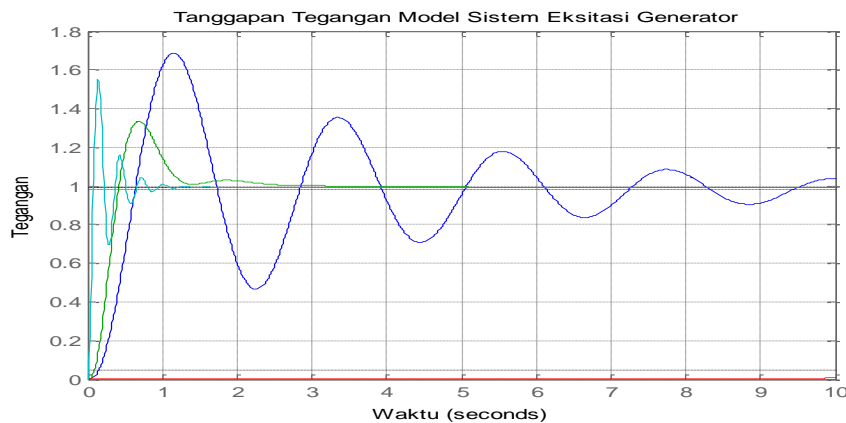
Berdasarkan Tabel 1. dan Gambar 5. terlihat bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* dan sistem eksitasi generator tipe statik mempunyai nilai kesalahan yang terkecil sebesar 0.00550, sedangkan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* mempunyai nilai kesalahan terbesar sebesar 0.9524.

Untuk analisa peralihan, parameter yang diamati terdiri dari waktu naik, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum, waktu puncak dan nilai puncak. Untuk model – model sistem eksitasi generator yang digunakan diperoleh hasil analisa peralihan yang diperlihatkan pada Tabel 2. berikut

Tabel 2. Analisa Kesalahan Sistem Eksitasi Generator

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Rate Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Kriteria	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Waktu Naik	0.3984 detik	0.2587 detik	209.3107 detik	0.0526 detik
Waktu Keadaan Mantap	13.3906 detik	2.2841 detik	370.8866 detik	0.8975 detik
Lewatan maksimum	71.1525 %	34.1233 %	0.0000 %	55.9941 %
Waktu Puncak	1.0951 detik	0.6832 detik	1.1371×10^3 detik	0.1413 detik
Nilai Puncak	1.6780	1.3338	0.0476	1.5513

Untuk tanggapan tegangan model – model sistem eksitasi generator terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 6. berikut



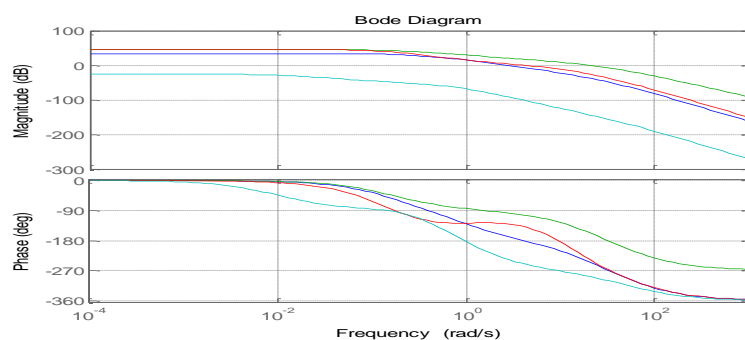
Gambar 6. Tanggapan Tegangan Model – Model Sistem Eksitasi Generator

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 2. dan Gambar 6. diperoleh informasi bahwa untuk waktu naik, waktu puncak dan waktu keadaan mantap, model sistem eksitasi generator tipe statik memiliki nilai yang paling kecil dimana waktu naik sebesar 0.0526 detik, waktu puncak sebesar 0.1413 detik dan waktu keadaan mantap sebesar 0.8975 detik. Untuk lewatan maksimum dan nilai puncak, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* memiliki nilai yang paling kecil dimana lewatan maksimum sebesar 0.0000 % dan nilai puncak sebesar 0.0476. Berdasarkan informasi tersebut sistem eksitasi generator tipe statik memiliki kecepatan tanggapan yang paling baik sedangkan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* memiliki kualitas tanggapan yang paling baik. Hasil analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi untuk model – model sistem eksitasi generator diperlihatkan pada Tabel 3. berikut

Tabel 3. Performansi Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi Untuk Sistem Eksitasi Generator

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Rate Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Kriteria	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Margin Penguatan	2.0966 (6.4302 dB)	3.4559 (10.7710 dB)	2460 (67.8190 dB)	2.3607 (7.4607 dB)
Frekuensi Margin Penguatan	4.0691 rad/detik	9.5128 rad/detik	0.9446 rad/detik	31.8070 rad/detik
Margin Fasa	12.0921 derajat	42.2290 derajat	Tidak Terhingga	24.1360 derajat
Frekuensi Margin Fasa	2.7824 rad/detik	3.9408 rad/detik	Tidak Terhingga	19.8120 rad/detik

Untuk tanggapan tegangan model – model sistem eksitasi generator dalam domain frekuensi diperlihatkan dengan Diagram Bode pada Gambar 7. berikut



Gambar 7. Diagram Bode Model – Model Sistem Eksitasi Generator

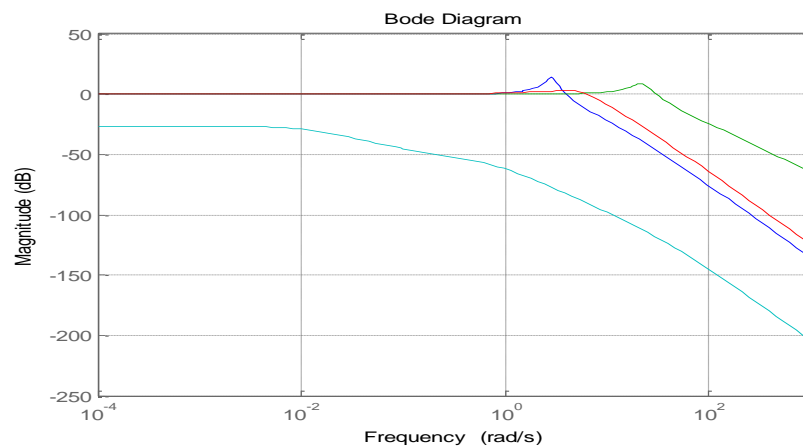
Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 3. dan Gambar 7. diperoleh informasi bahwa margin penguatan untuk semua model – model sistem eksitasi generator sudah memenuhi kriteria yang diinginkan dimana untuk semua model sistem eksitasi generator memiliki nilai margin penguatan sebesar 6 dB. Untuk margin fasa

hanya model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* saja yang memenuhi kriteria yang diinginkan dengan nilai sebesar 42.2290 derajat. Untuk model sistem eksitasi generator tipe arus searah, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan model sistem eksitasi generator tipe statik tidak memenuhi kriteria yang diinginkan. Untuk model – model sistem eksitasi generator yang digunakan diperoleh hasil analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi yang diperlihatkan pada Tabel 4. berikut

Tabel 4. Performansi Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi Untuk Sistem Eksitasi Generator

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Rate Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Kriteria	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Lebar Pita	4.3948 rad/detik	7.5876 rad/detik	0.0105 rad/detik	34.0770 rad/detik
Nilai Puncak Resonansi	4.8165	1.3922	0.0476	2.7171
Frekuensi Puncak Resonansi	2.8688 rad/detik	3.9318 rad/detik	0.0000 rad/detik	21.3150 rad/detik

Untuk tanggapan tegangan model – model sistem eksitasi generator dalam domain frekuensi diperlihatkan dengan Diagram Magnitude Bode pada Gambar 8. berikut



Gambar 8. Diagram Magnitude Bode Model – Model Sistem Eksitasi Generator

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 4. dan Gambar 8. diperoleh informasi untuk parameter lebar pita, sistem eksitasi generator tipe statik mempunyai lebar pita yang paling besar sehingga tanggapan tegangan dari sistem eksitasi generator tipe statik akan mempunyai waktu naik, waktu puncak dan waktu keadaan mantap yang paling yang cepat jika dibandingkan dengan sistem eksitasi generator tipe arus searah, tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* dan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback*. Untuk parameter nilai puncak resonansi dan frekuensi puncak, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* memenuhi kriteria performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi dimana agar sistem bersifat stabil maka nilai puncak resonansi harus bernilai antara 1.10 s/d 1.50. Untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah, tipe arus searah dengan *transient gain reduction* dan tipe statik tidak memenuhi kriteria performansi lingkaran tertutup dikarenakan nilai puncak resonansi yang terlalu besar untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah dan tipe statik dan terlalu kecil untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction*. Berdasarkan kriteria performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* yang memenuhi kriteria secara keseluruhan dengan lebar pita 7.5876 rad/detik, nilai puncak resonansi sebesar 1.3922 dan frekuensi puncak resonansi sebesar 3.9318 rad/detik.

Untuk model – model sistem eksitasi generator yang digunakan diperoleh nilai dari akar – akar persamaan karakteristik yang diperlihatkan pada Tabel 5. s/d Tabel Tabel 8. Berikut

Tabel 5. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Pole – Pole	Redaman	Frekuensi	Konstanta Waktu
$s_1 = -0.2890 + j2.8500$	0.1010	2.8700	3.4600
$s_2 = -0.2890 - j2.8500$	0.1010	2.8700	3.4600
$s_3 = -20.7000$	1.0000	20.7000	0.0483
$s_4 = -4.9900$	1.0000	49.9000	0.0200

Tabel 6. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Dengan *Rate Output Feedback*

Pole – Pole	Redaman	Frekuensi	Konstanta Waktu
$s_1 = -1.2300$	1.0000	1.2300	0.8150
$s_2 = -2.6400 + j4.8900$	0.4760	5.5600	0.3780
$s_3 = -2.6400 - j4.8900$	0.4760	5.5600	0.3780
$s_4 = -16.0000$	1.0000	16.0000	0.0623
$s_5 = -4.9600$	1.0000	4.9600	0.0202

Tabel 7. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Dengan *Transient Gain Reduction*

Pole – Pole	Redaman	Frekuensi	Konstanta Waktu
$s_1 = -0.0105$	1.0000	0.0105	95.3000
$s_2 = -0.5020$	1.0000	0.5020	1.9900
$s_3 = -0.9980$	1.0000	0.9980	1.0000
$s_4 = -50.0000 + j0.0358$	1.0000	50.0000	0.0200

Tabel 8. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Statik

Pole – Pole	Redaman	Frekuensi	Konstanta Waktu
$s_1 = -4.2400 + j21.7000$	0.1920	22.1000	0.2360
$s_2 = -4.2400 - j21.7000$	0.1920	22.1000	0.2360
$s_3 = -61.7000$	1.0000	61.7000	0.0162

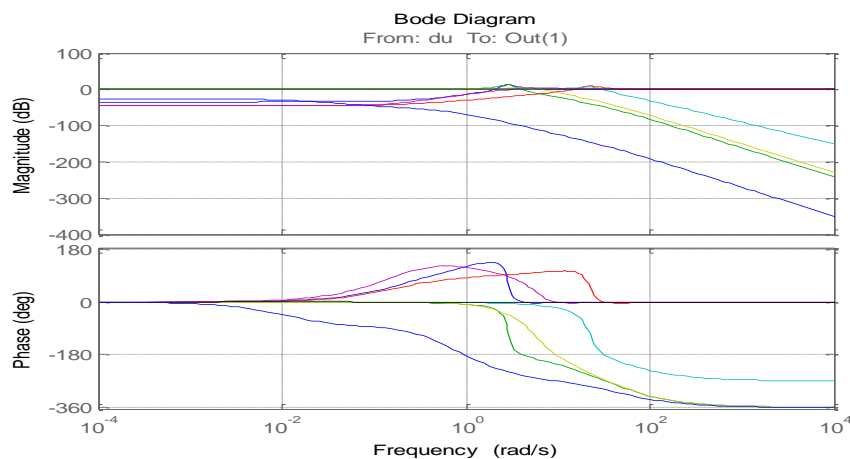
Berdasarkan hasil perhitungan yang diperlihatkan pada Tabel 5. s/d Tabel 9. terlihat bahwa model – model sistem eksitasi generator bersifat stabil. Hal ini dibuktikan dengan nilai dari pole – pole sistem lingkaran tertutup untuk tiap model sistem eksitasi generator mempunyai bagian nyata yang bernilai negatif sehingga tanggapan tegangan dari sistem eksitasi generator akan bersifat teredam untuk waktu yang tidak terhingga.

Analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Untuk model – model sistem eksitasi generator yang digunakan diperoleh nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer yang diperlihatkan pada Tabel 9. Berikut

Tabel 9. Nilai Puncak Maksimum Untuk Sistem Eksitasi Generator

Tipe	Arus Searah	Arus Searah Dengan Output Feedback	Arus Searah Dengan Transient Gain Reduction	Statik
Kriteria	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	5.0742	1.7893	1.0004	2.8292
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	4.8421	1.3929	0.0476	2.7171

Untuk tanggapan fungsi sensitivitas masukan dan fungsi sensitivitas komplementer untuk model – model sistem eksitasi generator diperlihatkan pada Gambar 9. berikut



Gambar 9. Fungsi Sensitivitas Masukan dan Fungsi Sensitivitas Komplementer Masukan

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 9. dan Gambar 9. terlihat bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *rate output feedback* dan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *transient gain reduction* bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi serta mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Hal ini dibuktikan dengan nilai puncak maksimum sensitivitas yang kurang dari 2.00 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer yang kurang dari 1.25 untuk kedua tipe dari sistem eksitasi generator. Untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah dan sistem eksitasi generator tipe statik tidak bersifat kokoh, tidak mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang lambat terhadap masukan tertentu dikarenakan nilai puncak maksimum sensitivitas besar dari 2.00 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer besar dari 1.25.

4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah

1. Untuk analisa kesalahan, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* dan sistem eksitasi generator tipe statik memiliki nilai kesalahan yang terkecil sebesar 0.0050
2. Untuk analisa peralihan, untuk waktu naik, waktu puncak dan waktu keadaan mantap, model sistem eksitasi generator tipe statik memiliki nilai yang paling kecil dan untuk lewatan maksimum dan nilai puncak, model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* memiliki nilai yang paling kecil
3. Untuk analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi, margin penguatan untuk semua model – model sistem eksitasi generator sudah memenuhi kriteria yang diinginkan dimana untuk semua model sistem eksitasi generator memiliki nilai margin penguatan sebesar 6 dB. Untuk margin fasa hanya model sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* saja yang memenuhi kriteria yang diinginkan.
4. Untuk analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, sistem eksitasi generator tipe statik mempunyai lebar pita yang paling besar dan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* memiliki nilai puncak resonansi dan frekuensi puncak resonansi yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

5. Untuk analisa kestabilan, bahwa seluruh model sistem eksitasi generator yang digunakan bersifat stabil.
6. Untuk analisa kekokohan, bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* dan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Transient Gain Reduction* bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi serta mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas yang telah memfasilitasi penelitian sehingga dihasilkan jurnal ini.

Daftar Pustaka

- [1] Bhatt, V. K., & Bhongade, S. (2013). Design of PID Controller In Automatic Voltage Regulator (AVR) Using PSO Technique. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1480 - 1485.
- [2] Eremia, M., & Shahidehpour, M. (2013). *Handbook of Electrical Power System Dynamics* . New Jersey: Wiley.
- [3] Franklin, G., Powell, J., & Naeini, A. E. (1986). *Feedback Control of Dynamics Systems* . New York : Addison - Wesley Publishing Company.
- [4] Graham, R. (1999). *Power System Oscillations* . Massachusetts: Kluwer Academic Publisher.
- [5] Laksono, H. D. (2014). *Kendali Sistem Tenaga Listrik Dengan Matlab*. Jogjakarta : Graha Ilmu .
- [6] Liu, Q., Mohamed, T. H., Kerdphol, T., & Mitani, Y. (2014). PID - MPC Based Automatic Voltage Regulator Design In Wide Area Interconnect Power Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 412 - 417.
- [7] Nagendra, M., & Krishnarayalu, M. (2012). PID Controller Tuning Using Simulink for Multi Area Power Systems. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1-9.
- [8] Ogata, K. (1996). *Teknik Kontrol Automatik* . Jakarta : Penerbit Erlangga .
- [9] Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*. New York: McGraw Hill.
- [10] Singh, O., Agarwal, S., & Singh, S. (2013). Automatic Voltage Control for Power System Stability Using PID and Power Logic Control . *International Journal of Engineering Research and Technology*, 193-198.
- [11] Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (1996). *Multivariable Feedback Control Analysis and Design* . New York : McGraw Hill.