

## Perancangan dan Analisa Kendali Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah dengan Pidtool Model Paralel

Heru Dibyo Laksono<sup>1,\*</sup>, M. Revan<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas

Email: heru\_dl@ft.unand.ac.id<sup>\*</sup>)

### Abstrak

Jurnal ini membahas perancangan dan analisa kendali sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan PIDTool model Paralel. Adapun tipe pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional (P), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Diferensial (PD), pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), pengendali Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF). Untuk analisa kendali sistem eksitasi generator tipe arus 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 kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) memenuhi kriteria perancangan yang diinginkan.

**Kata Kunci:** sistem eksitasi generator tipe arus searah, kesalahan, peralihan, performansi, kestabilan, kekokohan

### Abstract

This journal discusses the design and analysis of generator excitation system control in direct current type with PIDTool of Parallel model. The type of controller is designed include Proportional controller (P), Proportional Integral controller (PI), Proportional Differential controller (PD), Proportional Integral Differential controller (PID), Proportional Differential controller with First Order Filter In Part Differential (PDF) and Proportional Integral Differential controller with First Order Filter in Part Differential (PIDF). For analyzing of generator excitation system control in the current type 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 Results of the analysis showed that the generator excitation system control in direct current type with Proportional Differential controller with First Order Filter In Part Differential (PDF) fulfilled the desired design criteria.

**Keywords:** Generator Excitation System in Direct Current Type, Error, Transient, Performance, Stability, Robustness

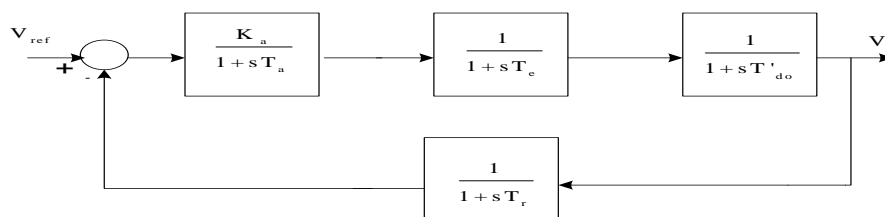
## 1. Pendahuluan

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).

Agar tegangan pada sistem eksitasi ini berada pada nilai kerja yang diinginkan maka perlu dilakukan pengendalian. Pada penelitian ini dilakukan pengendalian tegangan pada sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan menggunakan pengendali diantaranya pengendali Proporsional (P), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Diferensial (PD), pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF). Beberapa penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah adalah (Nagendra & Krishnarayalu, 2012) membahas pengendalian sistem eksitasi generator dengan menggunakan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan bantuan Simulink dan analisa yang dilakukan pada jurnal ini adalah analisa peralihan dan tipe sistem eksitasi yang digunakan adalah tipe sistem eksitasi generator 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 tersebut pembahasan yang dilakukan meliputi analisa peralihan dan analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi serta tipe sistem eksitasi yang digunakan adalah tipe sistem eksitasi generator arus searah. (Bhatt & Bhongade, 2013), membahas perancangan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) pada sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan teknik PSO dengan penekanan pada analisa peralihan. (Liu, Mohamed, Kerdphol, & Mitani, 2014) membahas tentang perancangan pengendali PID – MPC pada sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pembahasan pada analisa peralihan. Berdasarkan hasil – hasil penelitian sebelumnya terlihat bahwa pengendalian sistem eksitasi generator tipe arus searah ini banyak dilakukan dengan menggunakan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dan sistem eksitasi generator tipe arus searah. Untuk itu dilakukan studi tentang perancangan dan analisa kendali pada sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan tujuan untuk memperoleh informasi mengenai analisa kesalahan, analisa peralihan, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Untuk perancangan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab menggunakan fungsi PIDTool model paralel. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan bahan informasi untuk perancangan sistem kendali eksitasi generator. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah model sistem eksitasi generator yang dianalisa adalah model sistem yang bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu dan sistem eksitasi generator tipe arus searah bersifat satu masukan dan satu keluaran.

## 2. Metoda Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur tentang sistem kendali eksitasi generator khususnya sistem eksitasi generator tipe arus searah serta dilanjutkan dengan pemodelan sistem eksitasi generator tipe arus searah. 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 nilai parameter model sistem eksitasi generator tipe arus searah diperlihatkan pada Tabel 1. berikut (Graham, 1999)

Tabel 1. Nilai Parameter Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Parameter	Nilai
$K_a$	50.0000
$T_a$	0.0500 detik
$T_e$	1.0000 detik
$T'_{do}$	6.0000 detik
$T_r$	0.0200 detik

Selanjutnya dengan mensubstitusi nilai – nilai parameter pada Tabel 1. Ke diagram blok Gambar 1. diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari model sistem eksitasi generator tipe arus searah tersebut dengan tegangan terminal sebagai keluaran dan tegangan referensi sebagai masukan. Setelah diperolehnya fungsi alih dari model sistem eksitasi generator tipe arus searah ini kemudian dilanjutkan dengan analisa sistem eksitasi generator tanpa pengendali. 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 kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan (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 kriteria Bode. Untuk kriteria Bode (Skogestad & Postlethwaite, 1996) dimana sistem lingkaran tertutup akan bersifat stabil jika dan hanya jika magnitude dari sistem lingkaran terbuka bernilai kurang dari 1 pada frekuensi di mana sudut fasa  $180^0$ . 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.

Setelah analisa sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa pengendali selesai dilakukan kemudian dilanjutkan dengan penentuan kriteria perancangan untuk pengendali. Kriteria perancangan yang ditentukan dalam domain waktu, domain frekuensi, kestabilan dan kekokohan. Untuk domain waktu, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah mempunyai kesalahan keadaan mantap kurang dari 5 %, waktu keadaan mantap kurang dari 5 detik dan lewatan maksimum kurang dari 20 %. Untuk domain frekuensi, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah mempunyai margin penguatan besar dari 6 dB dan margin fasa antara 30 derajat s/d 60 derajat. Untuk kestabilan, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator harus bersifat stabil dengan pengendali. Untuk kekokohan, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator harus bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu.

Setelah kriteria perancangan ditentukan kemudian dilanjutkan dengan perancangan pengendali. Pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional (P), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Diferensial (PD), pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF). Adapun fungsi alih dari pengendali dinyatakan dalam bentuk persamaan (1) berikut

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1} \tag{1}$$

Setelah proses perancangan pengendali kemudian dilanjutkan dengan penurunan fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dengan pengendali dan dilanjutkan dengan analisa sistem kendali. Analisa yang dilakukan sama dengan analisa sistem kendali tanpa pengendali sehingga nantinya diperoleh sistem kendali sistem eksitasi generator tipe arus searah yang sesuai dengan kriteria perancangan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

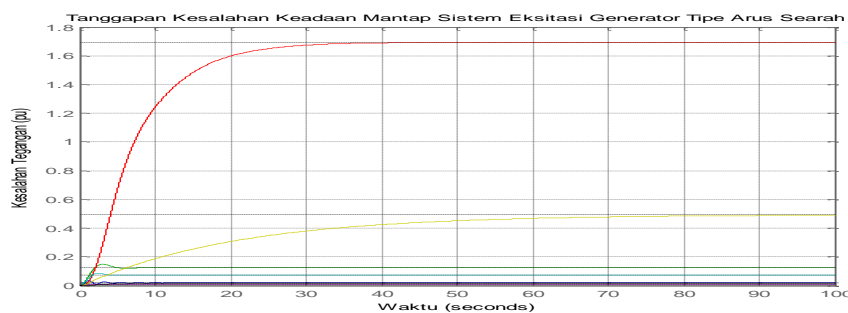
Pada bagian ini dilakukan analisa tanggapan tegangan sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional (P), Integral (I), Proporsional Integral (PI), Proporsional Diferensial (PD), Proporsional Integral Diferensial (PID), Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan Proporsional Integral Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF). Analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab yang meliputi analisa kesalahan, analisa peralihan, analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi, analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, analisa kekokohan dan analisa sensitivitas.

Untuk analisa kesalahan sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah, parameter yang diamati adalah kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan. Hasil analisa kesalahan sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali diperlihatkan pada Tabel 2. Berikut

Tabel 2. Analisa Kesalahan Sistem Eksitasi Generator

Pengendali	Nilai
Tanpa Pengendali	0.0196
Proporsional (P)	0.1244
Proporsional Integral (PI)	0.0000
Proporsional Diferensial (PD)	0.0742
Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF)	0.0468
Proporsional Integral Diferensial (PID)	0.0000
Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF)	0.0000

Untuk tanggapan kesalahan keadaan mantap sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 2. berikut



Gambar 2. Tanggapan Kesalahan Keadaan Mantap Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Berdasarkan Tabel 2. dan Gambar 2. terlihat bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai nilai kesalahan yang terkecil sebesar 0.0000.

Untuk analisa peralihan, parameter yang diamati terdiri dari waktu naik, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum, waktu puncak dan nilai puncak. Hasil analisa peralihan untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali diperlihatkan pada Tabel 3. dan Tabel 4.

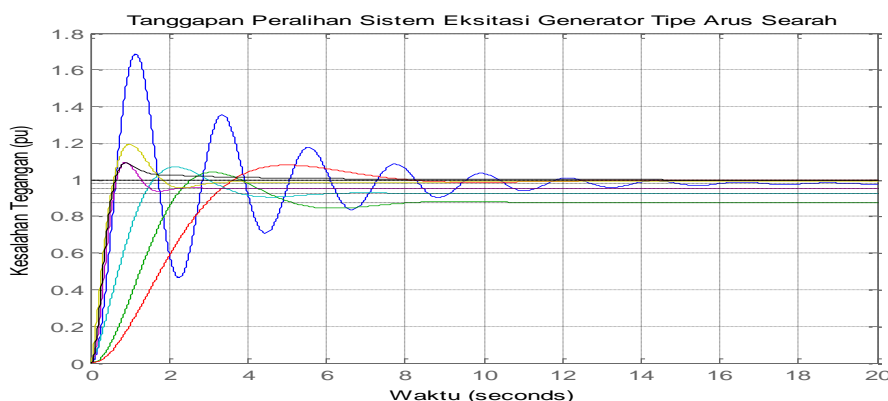
Tabel 3. Analisa Peralihan Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	P	PI	PD
Waktu Naik	0.3984 detik	1.3710 detik	2.3909 detik	1.0006 detik
Waktu Keadaan Mantap	13.3906 detik	7.2240 detik	7.2548 detik	4.9202 detik
Lewatan maksimum	71.1525 %	18.9476 %	8.0047 %	15.6171 %
Waktu Puncak	1.0951 detik	3.1564 detik	5.0512 detik	2.1777
Nilai Puncak	1.6780	1.0415	1.0800	1.0703

Tabel 4. Analisa Peralihan Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	PDF	PID	PIDF
Waktu Naik	0.3984 detik	0.3962 detik	0.4231 detik	0.4003 detik
Waktu Keadaan Mantap	13.3906 detik	1.4047 detik	3.0221 detik	2.7533 detik
Lewatan maksimum	71.1525 %	14.8511 %	19.4608 %	9.1535 %
Waktu Puncak	1.0951 detik	0.9022 detik	1.0039 detik	1.0915 detik
Nilai Puncak	1.6780	1.0947	1.1946	0.9118

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 3. berikut



Gambar 3. Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 3., Tabel 4. dan Gambar 3. diperoleh informasi peralihan untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali. Untuk waktu naik waktu puncak dan waktu keadaan mantap, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) memiliki nilai yang paling kecil dengan nilai 0.3962 detik untuk waktu naik, 0.9022 detik untuk waktu puncak dan 1.4047 detik untuk waktu keadaan mantap. Untuk lewatan maksimum, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral (PI) memiliki nilai yang paling kecil dengan nilai 8.0047 %. Untuk nilai puncak, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) memiliki nilai yang paling kecil dengan nilai 0.9918.

Untuk analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi, parameter yang diamati terdiri dari margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa. Untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali, hasil analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi diperlihatkan pada Tabel 5. dan Tabel 6. berikut

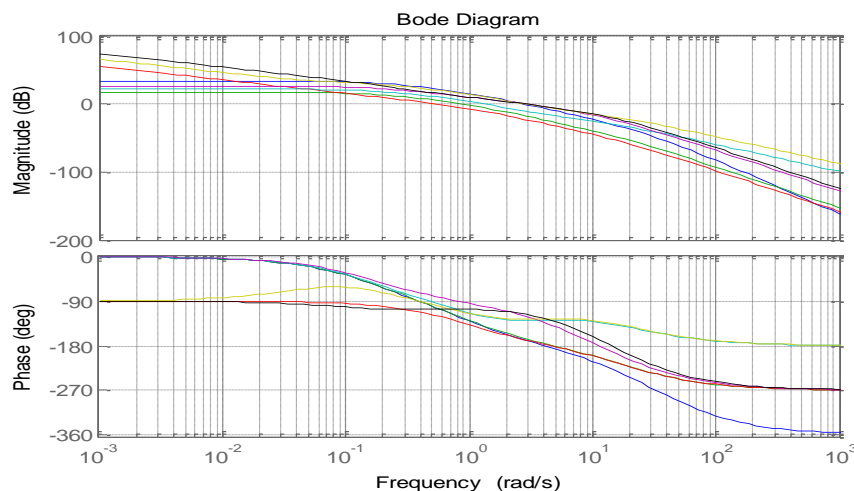
Tabel 5. Performansi Lingkar Terbuka Untuk Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	P	PI	PD
Margin Penguatan	6.4302 dB	26.4670 dB	30.5730 dB	Tidak Terhingga
Frekuensi Margin Penguatan	4.0691 rad/detik	4.8477 rad/detik	4.4959 rad/detik	Tidak Terhingga
Margin Fasa	12.0920 derajat	57.3790 derajat	60.6850 derajat	59.5160 derajat
Frekuensi Margin Fasa	2.7824 rad/detik	0.8690 rad/detik	0.5480 rad/detik	1.3154 rad/detik

Tabel 6. Performansi Lingkar Terbuka Untuk Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	PDF	PID	PIDF
Margin Penguatan	6.4302 dB	18.4970 dB	Tidak Terhingga	19.9520 dB
Frekuensi Margin Penguatan	4.0691 rad/detik	11.3040 rad/detik	Tidak Terhingga	14.3090 rad/detik
Margin Fasa	12.0920 derajat	59.2480 derajat	54.2980 derajat	63.2640 derajat
Frekuensi Margin Fasa	2.7824 rad/detik	2.8808 rad/detik	2.8806 rad/detik	2.8812 rad/detik

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah dalam domain frekuensi untuk performansi lingkar terbuka diperlihatkan dengan Diagram Bode pada Gambar 4. berikut



Gambar 4. Diagram Bode Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 5, Tabel 6 dan Gambar 4. diperoleh informasi bahwa margin penguatan untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali sudah memenuhi kriteria yang diinginkan yaitu sebesar 6 dB kecuali untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD) dan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) memiliki margin penguatan tidak terhingga. Untuk margin fasa, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional (P), dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD), dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) sudah memenuhi kriteria perancangan yang diinginkan dimana margin fasa yang diperoleh berkisar antara 30 derajat sampai 60 derajat sedangkan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral (PI) dan dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) tidak memenuhi kriteria perancangan.

Untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali diperoleh hasil analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi yang diperlihatkan pada Tabel 7. dan Tabel 8. berikut

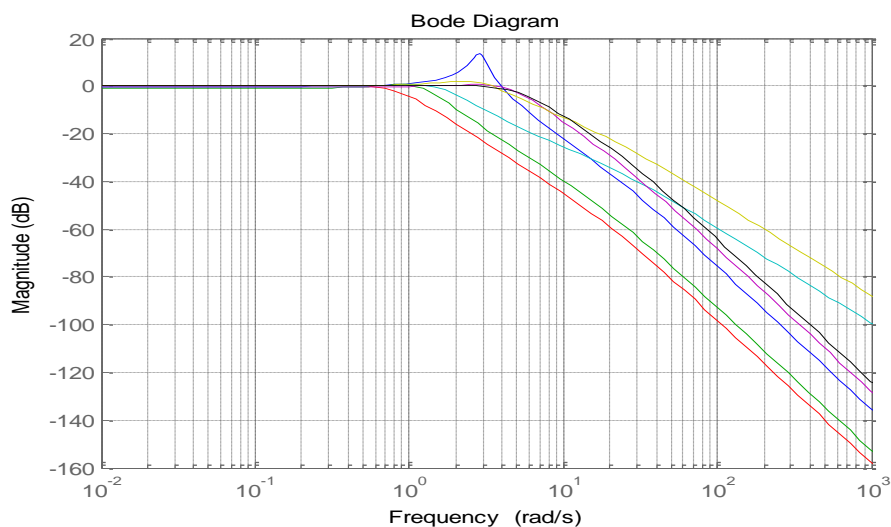
Tabel 7. Performansi Lingkaran Tertutup Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	P	PI	PD
Lebar Pita	4.3948 rad/detik	1.5073 rad/detik	0.8985 rad/detik	2.0149 rad/detik
Nilai Puncak Resonansi	4.8165	1.0582	1.0210	1.0659
Frekuensi Puncak Resonansi	2.8688 rad/detik	0.8509 rad/detik	0.3649 rad/detik	1.0073 rad/detik

Tabel 8. Performansi Lingkaran Tertutup Untuk Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah

Tipe	Tanpa Pengendali	PDF	PID	PIDF
Lebar Pita	4.3948 rad/detik	5.3140 rad/detik	4.4118 rad/detik	5.1970 rad/detik
Nilai Puncak Resonansi	4.8165	1.1669	1.2596	1.0467
Frekuensi Puncak Resonansi	2.8688 rad/detik	0.5622 rad/detik	2.1070 rad/detik	1.0913 rad/detik

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali dalam domain frekuensi untuk performansi lingkaran tertutup diperlihatkan dengan diagram Magnitude Bode pada Gambar 5. berikut



Gambar 5. Diagram Magnitude Bode Sistem Eksitasi Generator Tipe Generator Arus Searah

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 7. Tabel 8. dan Gambar 5. diperoleh informasi untuk parameter lebar pita dimana sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF), dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dan dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) memiliki lebar pita yang lebih besar dibandingkan dengan sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa pengendali. Untuk parameter nilai puncak resonansi dan frekuensi puncak resonansi, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) yang memenuhi kriteria perancangan dimana untuk sistem yang mempunyai performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi memiliki nilai puncak resonansi yang berkisar antara 1.10 s/d 1.50 sedangkan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali yang lain dan tanpa pengendali tidak memenuhi kriteria perancangan.

Analisa kestabilan untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali dilakukan dengan kriteria Bode. Untuk kriteria Bode dimana sistem lingkaran tertutup akan bersifat stabil jika dan hanya jika

magnitude dari sistem lingkaran terbuka bernilai kurang dari 1 pada frekuensi di mana sudut fasa  $180^0$  dan diperoleh hasil yang diperlihatkan pada Tabel 9. berikut.

Tabel 9. Kestabilan Menurut Kriteria Bode

Pengendali	Nilai	Status
Tanpa Pengendali	0.4770	Stabil
Proporsional (P)	0.0475	Stabil
Proporsional Integral (PI)	0.0296	Stabil
Proporsional Diferensial (PD)	0.0000	Stabil
Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF)	0.1189	Stabil
Proporsional Integral Diferensial (PID)	0.0000	Stabil
Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF)	0.1006	Stabil

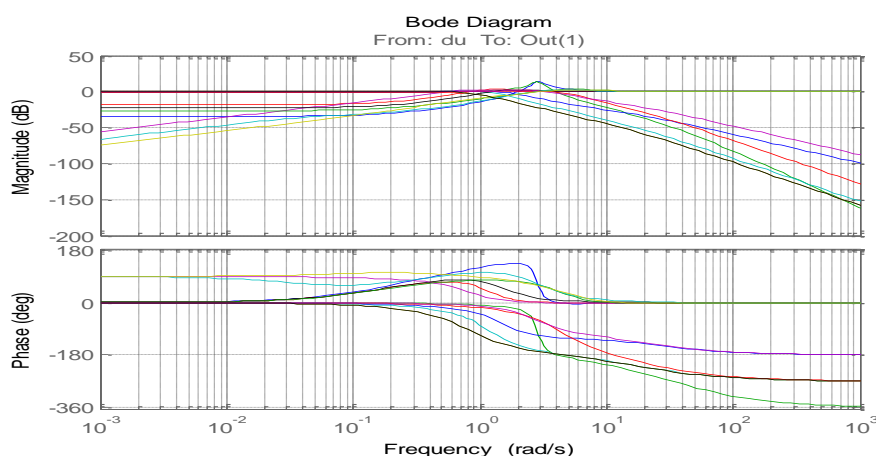
Berdasarkan hasil perhitungan yang diperlihatkan pada Tabel 9. terlihat bahwa sistem eksitasi generator tanpa dan dengan pengendali bersifat stabil. Hal ini dibuktikan dengan nilai magnitude dari fungsi alih lingkaran terbuka bernilai kurang dari 1.0000.

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 sistem eksitasi generator tipe arus searah tanpa dan dengan pengendali diperoleh nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer yang diperlihatkan pada Tabel 10. berikut.

Tabel 10. Nilai Puncak Maksimum Untuk Sistem Eksitasi Generator

Pengendali	Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer
Tanpa Pengendali	5.0742	4.8421
Proporsional (P)	1.4668	1.0585
Proporsional Integral (PI)	1.3626	1.0223
Proporsional Diferensial (PD)	1.2576	1.0684
Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF)	1.5000	1.0670
Proporsional Integral Diferensial (PID)	1.2522	1.2623
Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF)	1.3820	1.0485

Untuk tanggapan fungsi sensitivitas masukan dan fungsi sensitivitas komplementer untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah diperlihatkan pada Gambar 6. berikut.



Gambar 6. Fungsi Sensitivitas Masukan dan Fungsi Sensitivitas Komplementer Masukan



Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 10. dan Gambar 6. terlihat bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional (P), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Diferensial (PD), pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) 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 sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) bersifat kokoh tetapi tidak mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang lambat terhadap masukan tertentu dikarenakan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer besar dari 1.25.

#### 4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah :

- Pengendali sistem eksitasi generator tipe arus searah yang memenuhi kriteria perancangan adalah pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF).
- Untuk analisa kesalahan, sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai tingkat kesalahan sebesar 0.0468.
- Untuk analisa peralihan, sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai waktu keadaan mantap sebesar 1.4047 detik dan lewatan maksimum sebesar 14.8511 % .
- Untuk analisa performansi lingkaran dalam dalam domain frekuensi, sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai margin penguatan sebesar 18.4970 dB pada frekuensi 11.3040 rad/detik, margin fasa sebesar 59.2480 pada frekuensi 2.8808 rad/detik
- Untuk analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai lebar pita yang lebih besar sebesar 5.3140 rad/detik, nilai puncak resonansi sebesar 1.1669 pada frekuensi resonansi 0.5622 rad/detik
- Untuk analisa kestabilan, sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) bersifat stabil dengan indikator tingkat penguatan sebesar 0.1189
- Untuk analisa kekokohan, sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) mempunyai nilai sensitivitas sebesar 1.5000 dan nilai sensitivitas komplementer sebesar 1.0670. Hal ini menunjukkan sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) bersifat kokoh, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai kecepatan 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.

#### Referensi

- [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.